الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : Aguaitia Aya

Sujet

COMPORTEMENT EN STATIQUE ET EN DYNAMIQUE DES SANDWICHS EN BETON POLYMERE

Présenté et soutenu publiquement, le 11 / 06 /2025, devant le jury composé de :

Dr. LAYADI ISMAIL	Président
Dr. Abderrahmani Sifeddine	Rapporteur
Prof . HARKATI El-Haddi	Encadreur

Promotion : 2024/2025

Dédicacé

À Dieu, avant toute chose, je rends grâce à Celui qui commence tout et accomplit tout.

Par Sa bénédiction, les chemins se sont ouverts et Sa lumière a dissipé les obstacles.

Sans Lui, aucun commencement n'aurait été possible, et aucune fin ne pourrait se réaliser.

À mon père, l'homme dont je porte fièrement le nom, celui qui a tout donné pour mon bonheur sans jamais demander en retour. Ta force m'a portée, ton amour m'a élevée.

À ma mère, pilier de douceur et de foi, dont les prières silencieuses m'ont accompagné à chaque pas, je dédie toute ma reconnaissance.

À mon frère et mes sœurs, merci pour vos gestes simples, vos sourires sincères, et cette présence chaleureuse qui rend tout plus supportable.

À l'âme chère à mon cœur ,ton soutien discret mais puissant à chaque tournant de cette aventure a fait toute la différence.

À mes amis fidèles, qui ont su trouver les mots justes, offrant leur écoute, leur tendresse et leur patience tant dans les heures sombres que dans les moments de joie,

je suis profondément reconnaissant.

À mon directeur de thèse, dont la patience, la rigueur intellectuelle et l'encouragement constant ont transcendé cette expérience au-delà du cadre académique, travailler à vos côtés a été un véritable privilège.

Merci à chacun d'entre vous, du fond du cœur.

REMERCIMENT

Avant tout, je rends grâce à Dieu, Allah Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le Professeur HARKATI El-Haddi , professeur au département de génie civil de la Faculté des Sciences t Technologies de l'Université de Tébessa, et directeur du laboratoire de mines, pour son soutien constant, ses conseils éclairés et la générosité dont il a fait preuve tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie également chaleureusement l'ensemble du corps enseignant du département de génie civil, qui a largement contribué à enrichir mes connaissances au cours de ma formation.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à l'évaluation de ce travail.

Enfin, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à ma famille, pour son soutien indéfectible et ses encouragements précieux, qui m'ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours.

SOMMAIRE :

Dédicace……..……..…….....I

Remerciements……..…….... II

Résume……..…….…. III

Liste des figures ……..…….....IV

Liste de tableaux…….....V

Notations et Symboles…….....VI

Introduction générale ……..……....1

Etude Bibliographique.....3

CHAPITRE 1

1 Généralités sur les Matériaux Composites et sandwich à cœur en béton Polymère.....1

1.1 Introduction 8

1.1.1 Le béton polymère : 8

1.1.2 Composition principale du béton polymère :.....9

1.1.3 Les caractéristiques intrinsèques du béton polymère:[32].....10

1.1.4 Les types de béton polymère : 11

1.1.5 Avantages du Béton Polymère :[32].....12

1.1.6 Les inconvénients du Béton Polymère :[32].....13

1.1.7 Les matériaux utilisés : 13

1.2 Définitions des composites :.....15

1.2.1 Constituants des matériaux composites :.....15

1.2.2 Matériaux composites structuraux :.....21

1.3 Élaboration des composites à matrice organique : 25

1.3.1 Moulage sans pression:.....25

1.3.2 Moulage sous vide:.....26

1.3.3 Moulage par compression :.....26

1.3.4 Moulage par enroulement filamentaire :.....26

1.3.5 Moulage par projection :.....27

CHAPITRE 2

2 Comportement mécanique des matériaux composites et sandwichs 28

2.1 L'élasticité dans les matériaux composites.....29

2.1.1 Matrice de rigidité 29

2.1.2 Matrice de flexibilité (souplesse) 29

2.2 Types de matériaux.....30

2.2.1 Matériaux anisotropes.....30

2.2.2 Matériau monoclinique :.....31
2.2.3 Matériau orthotrope :.....31
2.2.4 Matériau Unidirectionnel.....31
2.2.5 Matériau isotrope :.....32
2.3 Comportement élastique d'un matériau composite orthotrope 32
2.3.1 Relations d'élasticité dans un système d'axes quelconque.....34
2.3.2 Equations d'élasticité pour un état de contraintes planes 35
2.3.3 Constantes de rigidité réduites en dehors de ses axes principaux.....36
2.4 La théorie adaptée en flexion des poutres sandwichs.....36
2.4.1 Hypothèses de la théorie des plaques sandwichs :.....37
2.4.2 Equations Constitutives.....38
2.4.3 Modèle bidimensionnel d'une poutre en flexion simple 39
2.4.4 Rigidité en flexion 39
2.5 Flexion des poutres sandwichs 42
2.6 Homogénéisations et théorie classique des stratifies.....42
2.6.1 Flexion 3-points.....45
CHAPITRE 3
3 Modélisation de l'impact de l'empilement sur les contraintes 47
3.1 Caractéristiques Mécaniques des matériaux utilisés : 49
3.1.1 Caractéristiques mécaniques des fibres de verre :.....49
3.1.2 Caractéristiques mécaniques de la résine époxyde : 49
3.1.3 Caractéristiques mécaniques de Béton polymère : 50
3.1.4 Séquences d'empilements utilisées : 50
3.2 Méthodes de calcul et simulations :.....51
3.2.1 Homogénéisation et théorie classique des Stratifiés 51
3.3 Simulation par éléments finis 53
3.3.1 Caractéristiques géométriques des éprouvettes : 54
3.3.2 Caractéristiques mécaniques des éprouvettes 54
3.3.3 Interprétations des résultats : 54
3.3.4 Distributions des champs des contraintes normales σ_{xx} dans les quatre starifiés 54
3.3.5 Distribution des champs de contraintes σ_{xx} dans les quatre stratifiés.....55
3.3.6 Distributions des champs des contraintes de cisaillement τ_{xz} dans les quatre stratifies....55
3.3.7 Distributions de champ de contrainte σ_{yy} dans les plis des quatre starifiés. 56
3.3.8 Distributions des déformations dans les plis des quatre starifiés.....59
3.3.9 Comparaison des résultats des différents stratifies.....60
3.3.10 Résultats des différents Modèle éléments finis 61
3.4 Analyse et comparaison :.....62
3.5 Conclusion :.....63

3.6 Influence du rapport de rigidité entre la peau et le cœur sur la contrainte de cisaillement dans une structure sandwich. 63
3.6.1 Interprétation et discussion des résultats : 63
3.6.2 Résultats et interprétation 64
3.6.3 Rôle respectif des peaux et du cœur selon le rapport de rigidité 64
3.6.4 Conséquences d'un cœur trop souple 64
3.6.5 Intérêt de l'optimisation du rapport de rigidité 65
3.6.6 Conclusion : 65
3.7 Effet du pourcentage de résine dans le béton polymère de l'âme 65
3.7.1 Résultats et analyses 66
3.7.2 Remarques et points sur le Graphe 66
3.7.3 Interprétation des résultats : 67
3.8 CONCLUSION : 68
4 CHAPITRE 4
4.1 Impacts à basse vitesse : Phénomène, mécanismes et influence sur les matériaux composites 70
4.1.1 Classification des impacts 71
4.1.2 Impact à basse vitesse (0 à 50 m/s) 71
4.1.3 Impact à vitesse modérée (50 à 200 m/s) 71
4.1.4 Impact à vitesse élevée (200 à 1 000 m/s) 71
4.1.5 Impact hyper vitesse (supérieur à 4 000 m/s) 71
4.2 Importance de l'étude de l'impact 72
4.2.1 Domaines d'applications du phénomène d'impact 72
4.3 Les essais d'impact : 74
4.3.1 Impact basse vitesse – définition : 75
4.4 Phénomène d'Impact à Basse Vitesse sur les Structures Composites : 75
4.5 Optimisation de la Résistance à l'Impact à Basse Vitesse 75
4.6 Hybridation des matériaux 76
4.7 Optimisation de la séquence d'empilement 76
4.8 Critères Énergétiques Avancés pour l'Analyse d'Impact 76
4.9 Paramètres définissant les Critères Énergétiques pour l'Évaluation de l'Impact 77
4.9.1 Endommagement (Damage) : 77
4.9.2 2-Énergie de dissipation du dommage (ALLDMD) : 77
4.9.3 3-Énergie totale (E_totale) : 77
4.9.4 Facteur critique : défini par : 78
4.10 Analyse des dommages par impact à basse vitesse sur structures composites 78
4.10.1 Implications industrielles : Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une optimisation poussée des paramètres de conception des composites, notamment par : 79
4.11 Formulation mathématique d'impact : 79

4.11.1 Modèle géométrique avec l'impacteur : 81
4.11.2 Les caractéristiques des matériaux : 83
4.12 Analyse de l'Influence de la séquence d'empilement des couches composites 84
sur la résistance en impact des sandwiches en béton polymère....84
4.12.1 Résultats et Discussions....85
4.12.2 Effet des types de renforts utilisés : 86
4.13 Analyse de l'Influence du Matériau de Renforcement sur la Résistance à l'Impact à faible Vitesse87
4.13.1 Résultats des composites stratifiés : 87
4.14 Interprétation Comparative du Graphe de Déplacement U3 en Fonction du Temps....88
4.14.1 Résultats 89
4.15 Impact de l'hybridation des matériaux sur les propriétés de résistance à l'impact. 90
4.15.1 Mécanismes d'absorption d'énergie : 90
4.16 Conclusion....92

Liste des figures

Figure 1.1: Béton polymère 8
Figure. 1.2: Mise en œuvre d'une plaque de béton polymère.....10
Figure 1.3 : Courbe Granulométrique du sable siliceux 13
Figure 1.4 : matériau composite.....15
Figure 1.5 : Types de renfort 15
Figure 1.6: les différentes formes des renforts fibres de verre a) Roving de verre b) Tissu de verre c) Mat de verre. 16
Figure 1.7: Exemple de fibre de verre 16
Figure1.8: différents types des fibres de carbone 17
Figure 1.9 : Exemple de fibre d'aramide 18
Figure 1.10 : Différent type des résines 19
Figure 1.11: La résine époxyde 20
Figure 1.12: La résine polyester insaturée 20
Figure 1.13 Constitution d'une structure composite monocouche 21
Figure 1.14 : Constitution d'un stratifié 21
Figure 1.15: schématisation d'une sandwiche 22
Figure 1.16: Matériaux pour les peaux 23
Figure 1 .17 : Matériaux sandwiches à âmes pleines.....24
Figure 1.18: Matériaux sandwichs à âmes pleines.....24
Figure 1.19: Interface.....25
Figure 1.20: Moulage en contact.....25
Figure 1.21 : Moulage sous vide ou au sac 26
Figure 1.22 : Moulage par compression.....26
Figure 1.23: Moulage par enroulement filamentaire 26
Figure 1.24 *:* Moulage par projection 27
Figure 2.1 : Définition des contraintes et déformations en 3D 29
Figure 2.2 : Axes principaux 1,2, 3 et axes de référence $(\overline{1},\overline{2},3)=(x,y,z)$ d'une couche de stratifié.....34
Figure 2.3 : Plaque sandwich 37
Figure 2.4. Poutre sandwich chargée dans son plan 39
Figure 2.5 : Elément poutre 42
Figure 2.6 Elément poutre en flexion 3-points 45
Figure 3.1 Définition de la poutre utilisée et distribution des empilements.....48
Figure 3.2 Détail des séquences d'empilements testés.....49

Figure 3.3 les Quatre empilements utilisés et analysés : ST1, ST2, ST3 et ST4 50
Figure 3.4 Récapitulation des opérations de la méthode TCDS dans l'organigramme 52
Figure 3.5 : Modèles et éléments finis utilisés dans Abaqus 54
Figure 3.6 (a,b) Répartition des contraintes normales S_{xx} et de cisaillement S_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST1 56
Figure 3.7 (a,b) Répartition des contraintes normales S_{xx} et de cisaillement S_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST2.....57
Figure 3.8 (a,b) Répartition des contraintes normales S_{xx} et de cisaillement S_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST3.....57
Figure 3.9 (a,b) Répartition des contraintes normales S_{xx} et de cisaillement S_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST4.....58
Figure 3.10 (a,b) Répartition des contraintes normales S_{yy} dans l'épaisseur des stratifiés ST1, ST4 58
Figure 3.11 (a,b) Répartition des déformations e_x , e_y dans l'épaisseur des stratifiés ST1, ST4 59
Figure 3.12- Influence du rapport de rigidité peaux/cœur sur la répartition des contraintes dans une structure sandwich.....64
Figure 3.13 : Influence du pourcentage de résine sur la distribution des contraintes de cisaillement dans l'âme en béton polymère 67
Figure 3.14 Influence du pourcentage de résine sur la contrainte de cisaillement normalisée dans l'âme en béton polymère 67
Figure 4.1 : Plaque composite laminé et impacteur.....80
Figure 4.2a : Poutre de test avec l'impacteur et les séquences d'empilements utilisés 82
Figure 4.2b : Modèle EF de la moitié de la Poutre avec l'impacteur 82
Figure 4.3 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD et de l'énergie TOTALE pour les quatre empilements.....86
Figure 4.4 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD pour les sections composites stratifies.....87
Figure 4.5 : Déplacement du centre de la poutre en fonction de temps d'impact.....88
Figure 4.6 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD pour les sections hybrides en aluminium et les trois composites.....91

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : composition chimique du sable siliceux 14
Tableau 1 .2 : propriété de résine 14
Tableau 3.1 : Définition des éléments finis utilisés dans Abaqus 53
Tableau 3.2 : Résultats des quatre stratifies comparés à la poutre homogène..... 60
Tableau 3.3 : Résultats des différents modèles et éléments utilises compares au TCDS 62
Tableau 3.4 Modules élastiques du béton polymère en fonction de la teneur en résine……66

Tableau 4.1 : Exemples d'applications dans les secteurs industriels..... 74
Tableau 4.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux composites 83
Tableau 4.3 : les caractéristiques d'aluminium 84
Tableau 4.4 : les caractéristiques de béton polymère 84
Tableau 4.5 : Les résultats de l'effet de la séquence d'empilement 85
Tableau 4.6 : valeurs des facteurs critique pour trois composites comparées à l'aluminium..... 87

NOTATIONS

C_{ij} , $\overline{C}_{ij}$: Eléments de la matrice de rigidité dans les axes principaux et en dehors de ses axes ;

S_{ij} , $\overline{S}_{ij}$: Eléments de la matrice de souplesse dans les axes principaux et en dehors de ses axes ;

k : Module de compressibilité

E_L : Module de Young longitudinal

E_T : Module d'Young transversal

n_{LT} : Coefficient de Poisson

G_{LT} : Module de cisaillement.

A : Matrice de comportement en membrane.

D : Matrice de comportement en

B : Matrice de couplage membrane-cisaillement

$Q_{ij}, \overline{Q}_{ij}$: Constantes de rigidité réduite dans les axes principaux et en dehors de ses axes ;

σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} , σ_{xz} : Contraintes normales, et de cisaillement dans les axes principaux

ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} , ε_{xz} : Déformations normales, et de cisaillement dans les axes principaux

σ_L , σ_T et σ_{LT} : Contraintes normales, et de cisaillement dans les axes d'orthotropie

ε_L , ε_T et ε_{LT} : Déformations normales, et de cisaillement dans les axes d'orthotropie

σ_{ij}^k : Contraintes normales et de cisaillement de la couche *k ;*

n_{ij} : Coefficients de Poisson

σ_0 : Contrainte de flexion maximale

τ_0 : Contrainte de cisaillement maximale

M_f : Matrice des moments de flexion ;

N : Matrice des résultantes en membrane ;

N_x, N_y, N_{xy} : Résultantes, par unité de longueur, des contraintes normales (suivant les axes *x* et *y*) et des contraintes de cisaillement, dans le plan (*x,y*).

k : Numéro de la couche

Z : Profondeur de la couche

h_k *et* h_{k-1} : Distances entre l'axe du stratifié et sa face supérieure et inférieure

a_{ij}^k : Coefficients de rigidité du stratifié.

T_ε : Matrice de changement de base des déformations

T_σ : Matrice de changement de base des contraintes

D : Rigidité en flexion du sandwich

E_f , E_1, E_2 : Module d'élasticité des peaux

E_c : Module d'élasticité du cœur

G_c : Module de cisaillement du cœur

h_f , h_1, h_2 : Epaisseur des peaux sup. et inf.

t : Epaisseur des peaux identiques

h_c : Epaisseur du cœur

b : largeur de la poutre sandwich

S : Rigidité de cisaillement du sandwich

w : Flèche totale

mi : la masse de l'impacteur

wi : les déplacements de l'impacteur

ws : le déplacement du point sur la surface moyenne de la plaque

ẅ : l'accélération de l'impacteur

αi : la profondeur de l'indentation

C : Côté de la section carré.

σ_{crit} : Contrainte équivalente selon le critère de von Mises.

$\overline{\varepsilon}^{pl}$ & $\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}$: Déformation plastique équivalente et la vitesse de déformation équivalente.

$\dot{\overline{\varepsilon}}_0$: Vitesse de déformation de référence.

A : Limite d'élasticité.

B & n : Traduisent l'écrouissage.

C & m : la sensibilité à la vitesse de déformation et la sensibilité à la température

T & T_{room} & T_{melt} : Respectivement, la température, la température initiale et la température de fusion.

Résumé

Les matériaux composites, prisés pour leur excellent rapport résistance/poids, durabilité et adaptabilité, connaissent un essor rapide dans des secteurs variés comme l'aéronautique, le génie civil et les énergies renouvelables. Les structures sandwich, combinant peaux rigides en fibres (verre, carbone, Kevlar) et âme en béton polymère, se distinguent par leurs performances en flexion et absorption d'énergie, grâce notamment à la rigidité et la dissipation énergétique de l'âme. Toutefois, l'analyse mécanique de ces structures, particulièrement face aux impacts à basse vitesse générant des dommages internes peu visibles est complexe en raison de la nature anisotrope et stratifiée des composites, nécessitant une modélisation avancée et une analyse pli par pli. Plusieurs paramètres influencent leur comportement, tels que la nature des matériaux, l'orientation des fibres et l'épaisseur des couches, et bien que la modélisation numérique soit puissante, elle repose sur des hypothèses simplificatrices et des modèles d'homogénéisation. L'étude présentée utilise une approche analytique validée par des modèles éléments finis avec Abaqus, intégrant des lois d'endommagement, pour évaluer l'effet de la séquence d'empilement sur la résistance en flexion et sous impact, dans le but d'optimiser ces structures pour des applications en génie civil et aéronautique .

Mot Clés : Composites, Sandwich, Modélisation, endommagement, optimisation multicritère, Flexion, Composites hybrides, mécanique de l'impact.

Abstract

Composite materials, valued for their excellent strength-to-weight ratio, durability, and adaptability, are experiencing rapid growth across various sectors such as aerospace, civil engineering, and renewable energy. Sandwich structures, combining rigid fiber skins (glass, carbon, Kevlar) with a polymer concrete core, stand out for their outstanding performance in bending and energy absorption, thanks to the core's rigidity and energy dissipation properties. However, the mechanical analysis of these structures, especially under low-velocity impacts that cause barely visible internal damage, is complex due to the anisotropic and layered nature of composites, requiring advanced modeling and layer-by-layer analysis. Several parameters influence their behavior, including material composition, fiber orientation, and layer thickness. Although numerical modeling is a powerful tool, it relies on simplifying assumptions and homogenization models. The present study employs an analytical approach validated by finite element models using Abaqus, incorporating damage laws to assess the effect of stacking sequences on flexural and impact resistance, aiming to optimize these structures for civil engineering and aerospace applications.

Keywords: Composites, Sandwich, Modeling, Damage, Multi-criteria Optimization, Bending, Hybrid Composites, Impact Mechanics.

ملخص

المواد المركبة، التي تتميز بنسبة ممتازة بين القوة والوزن، والمتانة، وقابلية التكيف، تشهد نمواً سريعاً في العديد من القطاعات مثل الطيران، الهندسة المدنية، والطاقة المتجددة. تتميز الهياكل الساندويتشية، التي تجمع بين طبقات خارجية صلبة من الألياف (الزجاج، الكربون، الكيفلار) ونواة من الخرسانة البوليمرية، بأداء استثنائي في الانحناء وامتصاص الطاقة، بفضل صلابة النواة وقدرتها على تبديد الطاقة. ومع ذلك، فإن التحليل الميكانيكي لهذه الهياكل، وخاصة عند تعرضها لصدمات منخفضة السرعة التي تسبب أضراراً داخلية غير مرئية تقريبًا، يعد معقدًا بسبب الطبيعة غير المتجانسة والمصفحة للمركبات، مما يستلزم نمذجة متقدمة وتحليلًا طبقة بطبقة. تؤثر العديد من العوامل على سلوكها، بما في ذلك تكوين المواد، واتجاه الألياف، وسُمك الطبقات. وعلى الرغم من أن النمذجة العددية تعد أداة قوية، إلا أنها تعتمد على فرضيات تبسيطية ونماذج تجانس. تعتمد هذه الدراسة على نهج تحليلي تم التحقق من صحته من خلال نماذج العناصر المحدودة باستخدام برنامجAbaqus ، مع دمج قوانين الضرر لتقييم تأثير ترتيب الطبقات على مقاومة الانحناء والتأثير، بهدف تحسين هذه الهياكل لاستخدامها في تطبيقات الهندسة المدنية والطيران.

الكلمات المفتاحية :المركبات، الساندويتش، النمذجة، التلف، التحسين متعدد المعايير، الانحناء، المركبات الهجينة، ميكانيكا الصدمات.

Introduction générale

Les matériaux composites connaissent un développement rapide et significatif dans des secteurs variés tels que l'aéronautique, le génie civil et les énergies renouvelables, principalement en raison de leur excellent rapport résistance/poids, de leur grande adaptabilité architecturale et de leur durabilité accrue. Parmi ces matériaux, les structures sandwich, constituées de peaux rigides associées à une âme légère, se distinguent par leurs performances mécaniques remarquables, notamment en flexion et en absorption d'énergie. L'intégration d'âmes en béton polymère — un mortier renforcé par une résine polymère thermodurcissable — suscite un intérêt croissant, du fait de leur rigidité spécifique élevée, de leur résistance aux chocs et de leur aptitude à dissiper l'énergie. Néanmoins, l'analyse mécanique de ces structures demeure complexe, en particulier sous sollicitations dynamiques telles que les impacts à basse vitesse, qui peuvent engendrer des dommages internes peu visibles (BVID) et compromettre ainsi leur intégrité à long terme.

L'étude du comportement des matériaux composites diffère fondamentalement de celle des matériaux isotropes, en raison de leur anisotropie et de leur structure stratifiée. Cette complexité impose le recours à des outils de modélisation avancés et à des méthodes spécifiques pour le traitement des données. En effet, l'évaluation des contraintes moyennes ne suffit pas à prédire la tenue des composites : une analyse détaillée pli par pli, fondée sur une approche tensorielle des contraintes, est indispensable. Contrairement aux matériaux ductiles, les composites présentent une faible tolérance aux sur contraintes, ce qui nécessite une compréhension approfondie des mécanismes d'endommagement, qu'ils soient statiques ou dynamiques.

De nombreux paramètres influencent le comportement global d'un stratifié, tels que la nature des constituants, la séquence d'empilement, l'orientation des fibres ou encore l'épaisseur des couches. Bien que la modélisation numérique soit un outil puissant, elle repose sur des hypothèses simplificatrices, la complexité tridimensionnelle des stratifiés limitant l'application directe des équations de l'élasticité linéaire. C'est pourquoi la majorité des approches s'appuie sur des modèles d'homogénéisation, qui permettent de déterminer des rigidités équivalentes à partir d'hypothèses de plaques ou de coques. Ces modèles, intégrés dans des logiciels de calcul tels qu'Abaqus, facilitent l'analyse structurelle tout en tenant compte des effets d'orientation, des termes de couplage et de la distribution des contraintes.

Dans le cas des structures sandwich, la synergie entre les peaux composites et le cœur en béton polymère est déterminante. Les fibres de verre, de carbone ou de Kevlar, noyées dans une matrice époxy, présentent des comportements distincts : le carbone offre une grande rigidité mais une fragilité accrue, la fibre de verre assure une dissipation modérée, tandis que le Kevlar combine une ténacité élevée à un coût plus important. L'orientation des plis influence fortement la réponse aux chocs : les fibres orientées à 0° optimisent la résistance axiale, tandis que les plis à ±45° améliorent la résistance

au cisaillement, notamment sous impact hors axe. Des séquences quasi-isotropes permettent quant à elles un compromis efficace entre résistance multiaxiale et limitation du délaminage.

Dans ce cadre, ce travail vise à étudier l'effet de la séquence d'empilement sur le comportement mécanique de structures sandwich composées de peaux en composite fibre de verre/résine époxy et d'une âme en béton polymère, soumises à des sollicitations en flexion statique et en impact à basse vitesse. Une approche par éléments finis est adoptée, utilisant des formulations de type coque (S4R) et volume (C3D8R), afin d'évaluer les champs de contraintes et de déformations à travers l'épaisseur. Les modèles intègrent des lois d'endommagement progressif : le critère de Hashin pour les peaux, et le modèle Brittle Cracking pour l'âme, simulés sous Abaqus/Explicit. Cette analyse permettra d'identifier les configurations d'empilement optimales pour améliorer la résistance au délaminage, la dissipation d'énergie et la résilience face aux impacts accidentels, avec des applications potentielles dans les panneaux de façade, les protections d'infrastructure et les éléments d'aménagement aéronautique.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse théorique et la modélisation numérique du comportement des matériaux composites stratifiés et des structures sandwiches à cœur en béton polymère, soumises à diverses sollicitations. Il s'articule autour de quatre chapitres.

La première partie offre une recherche bibliographique approfondie, mettant en lumière un large éventail d'études portant sur le comportement des matériaux composites et des structures sandwiches à cœur en béton à base de résine. Le premier chapitre propose une introduction générale aux matériaux composites stratifiés et sandwiches, suivie d'une présentation des technologies de fabrication et d'utilisation des bétons polymères.

Le deuxième chapitre expose les principes fondamentaux de la théorie de l'élasticité appliquée aux milieux orthotropes, en mettant particulièrement l'accent sur les composites stratifies hybrides et ceux à cœur en béton polymère. Le troisième chapitre examine l'effet de la séquence d'empilement ainsi que le rapport des épaisseurs à 0° et 90° sur la répartition des champs de contraintes et de déformations dans l'épaisseur des stratifiés croisés en fibre de verre. Cette étude porte notamment sur le comportement en statique linéaire lors de la flexion trois points, en comparant les résultats obtenus via un modèle d'éléments finis (MEF) à ceux issus d'un programme Fortran dédié à la théorie classique des stratifiés.

Enfin, le quatrième chapitre analyse le comportement à l'impact à basse vitesse des structures étudiées précédemment, en utilisant la méthode dynamique explicite. Le mémoire se conclut par une synthèse générale des principaux résultats obtenus.

Etude Bibliographique :

Depuis les années 1960, les bétons polymères (PCt), composés d'une résine polymère comme phase continue et d'agrégats minéraux, ont été développés comme alternative au béton Portland (PCC). Ces matériaux offrent une résistance accrue et un temps de durcissement plus court. Une thèse récente a porté sur le développement de bétons polymères à partir de matériaux locaux en Algérie, avec une optimisation du taux de résine polyester pour combiner performance et coût. L'étude a intégré des fibres de verre, Kevlar et de Carone comme renfort. L'incorporation de fibres dans ces bétons, bien que peu courante, pourrait améliorer leurs propriétés mécaniques, notamment la ductilité et la résistance aux fissures. Le processus de durcissement est crucial, et des recherches récentes étudient l'effet des rayonnements gamma sur ce durcissement et sur les propriétés mécaniques, notamment le module de Young, qui influence la ductilité ou la fragilité du matériau. Martínez-Barrera et al. [1] ont montré que le béton polymère présente une résistance élevée et un durcissement rapide. Toutefois, l'introduction de fibres dans la matrice permettrait d'accroître encore ses performances mécaniques. Leur étude révèle également que l'exposition à un rayonnement gamma modifie les propriétés du matériau, notamment le module d'Young, ce qui influence sa ductilité et son comportement dans des environnements agressifs ou irradiés.

D'autres recherches, telles que celles de Bedi et al. [2], se sont penchées sur l'effet des paramètres de formulation, notamment la nature et la quantité de résine, le type de fibres, les micros fillers et les agents de couplage. Les résultats soulignent la supériorité des résines époxy sur les polyesters en termes de performance et l'importance du choix des agrégats, en particulier en maintenant un taux d'humidité inférieur à 0,5 %, pour assurer une bonne adhérence et une meilleure résistance globale. Mani et al. [3] ont démontré que les bétons polymères à base de résine époxy et polyester présentent tous deux des performances nettement supérieures au béton conventionnel. L'ajout de charges minérales, comme le carbonate de calcium, ou d'agents de couplage améliore considérablement les propriétés des matrices polyester, permettant ainsi d'approcher les performances des formulations époxy.

Par ailleurs, l'étude expérimentale de Venkatesh [4] a mis en évidence que l'augmentation du taux de résine et de fibres de verre dans le mélange améliore significativement les résistances à la compression et à la flexion, bien que cela entraîne une augmentation des coûts. Cette conclusion rejoint celle de Jakub et al. [5], qui indiquent que la fraction volumique de résine et la taille des agrégats influencent directement la densité, la porosité et la résistance mécanique du béton polymère. Des approches complémentaires ont également été explorées pour améliorer les performances du béton polymère. Aziz et al. [6] ont étudié un adhésif modifié par du sable fin pour le collage de composites CFRP sur le béton armé. L'ajout de sable à hauteur de (50 %) améliore la résistance

mécanique de l'adhésif sans altérer son élasticité, réduisant ainsi les coûts tout en augmentant la capacité portante des structures renforcées.

Sur le plan environnemental, Bourguiba et al. [7] ont démontré que l'utilisation de sable recyclé dans les mortiers époxydes constitue une alternative viable aux matériaux traditionnels. L'ajout d'un diluant, tel que l'octante de méthyle, permet par ailleurs d'optimiser l'ouvrabilité et la durabilité du matériau face à la pénétration des ions chlorure. Enfin, l'étude de Mirouzia et al. [8] sur les micro-bétons polymères à base de résine polyester a permis d'identifier une teneur optimale en résine de 27 %, tout en mettant en évidence l'influence des proportions de sable et de fibres de verre sur la résistance et la déformation du matériau.

Bien qu'il soit possible, en théorie, de modéliser un stratifié comme un ensemble de couches de solides 3D, chacune régie par la théorie de l'élasticité linéaire et reliée aux autres par des équations de continuité et d'équilibre, cette approche reste difficile à mettre en œuvre sans hypothèses simplificatrices en raison de la complexité du problème. Ainsi, la plupart des théories traitant du comportement des stratifiés reposent sur une homogénéisation du stratifié, permettant de calculer des rigidités équivalentes pour un ensemble d'efforts intérieurs donnés. Les approches adoptées sont principalement basées sur des hypothèses de comportement mécanique de type plaque ou coque. Ces méthodes permettent d'évaluer les rigidités de traction, cisaillement et flexion, ainsi que les termes de couplage entre ces effets, en fonction de l'orientation, des propriétés mécaniques et de la distribution d'épaisseur des différentes couches. Ces propriétés globales du stratifié sont ensuite utilisées dans diverses analyses structurelles et dans les processus de conception propres aux structures composites. Face à la diversité des théories et des formulations disponibles, une classification générale est essentielle pour identifier les points forts et les limitations des grandes catégories de modèles.

L'influence de la séquence d'empilement sur le comportement et l'endommagement en fatigue des stratifiés croisés a été étudiée par Bezazi et al. [9], [10]. Une analyse tridimensionnelle par éléments finis a montré que la séquence d'empilement impacte le taux de rejets d'énergie [11]. L'effet de l'ordre d'empilement dans le cas de stratifiés du type (0m/90n)s et (90n/0m)s a été examiné par [12] à l'aide de la méthode des éléments finis. Ces auteurs ont analysé la réduction de la rigidité et de l'énergie dans les stratifiés croisés soumis à un chargement en fatigue en traction. Une approche macro mécanique a été employée par Tsai et Liu [13] pour étudier l'effet de l'empilement sur l'ordre des efforts et des contraintes dans les stratifiés. Grâce à l'utilisation de deux méthodes d'optimisation, ils ont déterminé l'ordre d'empilement optimal pour les stratifiés symétriques et non symétriques. Park et al. [14] ont optimisé la résistance maximale des stratifiés composites en utilisant des algorithmes génétiques afin de déterminer l'ordre d'empilement optimal sous diverses conditions de

chargement et de frontière. Une étude théorique sur la conception de plaques stratifiées symétriquement a été réalisée par Avalle M. et Belingardi G. [15], mettant en lumière l'influence de l'orientation des fibres et de l'épaisseur des couches. Ils ont démontré que l'orientation optimale de la fibre est unique et indépendante de l'ordre d'empilement. De plus, des résultats ont été obtenus concernant les valeurs optimales de l'épaisseur de chaque couche.

Le comportement des matériaux composites sous impact, notamment à basse vitesse, est un sujet de recherche crucial en raison des dommages internes non visibles qui peuvent altérer leurs performances mécaniques. Contrairement aux matériaux métalliques comme l'acier ou l'aluminium, qui dissipent l'énergie par déformation plastique, les composites absorbent cette énergie via des mécanismes complexes de rupture, incluant le délaminage, la fissuration matricielle et la rupture des fibres, rendant leur évaluation plus complexe. Depuis les années 1980, plusieurs études ont exploré cette problématique, établissant les fondements analytiques et expérimentaux grâce aux contributions de Serge Abrate [16], Umar Farrok [17], P.E. Reed et L. Beva [18], George Staab [19], ainsi que Kim M.J. et Gupta A. [20]. Ces recherches ont permis de mieux comprendre les mécanismes de défaillance sous impact à basse et haute vitesse, en mettant en évidence l'importance du délaminage et des fissurations matricielles. Parmi les contributions majeures, Serge Abrate [16] a développé des modèles analytiques pour classifier les types d'impact et prédire les dommages résiduels, tandis qu'Umar Farrok [17] a examiné l'effet des paramètres d'impact (masse, vitesse, énergie) sur la résistance des composites. Les études de P.E. Reed et L. Beva [18] ont introduit des techniques expérimentales pour quantifier la propagation des dommages internes, tandis que George Staab [19] a proposé des modèles prenant en compte l'anisotropie des matériaux. Kim M.J. et Gupta A. [20] ont analysé l'effet des impacts répétés sur la dégradation progressive des propriétés mécaniques, mettant en lumière l'importance des interfaces entre couches. D'autres travaux ont exploré la résistance des composites en fonction de leur composition : Ramin Hosseinzadeh et al. [21] ont étudié l'endommagement de plaques époxy/carbone et hybrides carbone/verre soumis à différents niveaux d'impact, mettant en évidence les performances mécaniques supérieures des plaques en carbone pur. Cesim Atas et Onur Sayman [22] ont montré une corrélation entre la vitesse d'impact et le degré d'endommagement dans des composites en fibres de verre/époxy, tandis que F.J. Yang et W.J. Cantwell [23] ont analysé l'initiation des dommages en fonction de l'épaisseur et de la température. W.A. de Morais et al. [24] ont démontré que les composites à fibres de carbone absorbent davantage d'énergie élastique que ceux en verre ou aramide, limitant ainsi la propagation du délaminage. L'effet de l'épaisseur des laminés sur leur résistance a été étudié par Giovanni Belingardi et al. [25], qui ont montré l'influence de la configuration d'empilement sur les courbes force-déplacement. Enfin, Z.Y. Zhang et al. [26] ont utilisé l'interférométrie pour visualiser les dommages internes dans des composites verre/polyester obtenus par pultrusion, établissant une relation entre l'énergie d'impact et

le niveau d'endommagement. L'impact à basse vitesse dans les composites reste un enjeu majeur en ingénierie, les études expérimentales ayant mis en évidence l'importance de plusieurs paramètres comme la nature des fibres, la matrice, la séquence d'empilement et la géométrie de l'impacteur sur la résistance et la rupture des matériaux. Ces résultats sont essentiels pour optimiser le dimensionnement des structures composites dans des secteurs critiques tels que l'aéronautique, l'automobile et les infrastructures.

Chapitre I

Généralités sur les Matériaux Composites et sandwich à cœur en béton Polymère

1.1 Introduction

Le béton polymère est un matériau composite innovant résultant du remplacement total ou partiel du liant cimentaire par une résine polymère. Cette substitution confère au béton des propriétés mécaniques améliorées, une meilleure résistance aux agents chimiques et une plus grande légèreté par rapport au béton traditionnel. Développé depuis la seconde moitié du XXe siècle, le béton polymère se distingue par sa durabilité et sa capacité à s'adapter à des environnements agressifs, ce qui en fait une solution prometteuse pour des applications variées dans le secteur de la construction. Malgré un coût initial plus élevé, ses performances supérieures et sa longévité en font un matériau de choix dans la recherche de solutions constructives durables et performantes.[27]

1.1.1 Le béton polymère :

Le béton polymère est un matériau composé de différents types d'agrégats. Ces derniers sont, qui sont liés par des résines de polyester afin d'assurer la solidité de chaque réalisation. Cette combinaison est complétée par l'ajout d'agrégats de silice et de quartz pour les bétons préfabriqués, ainsi que de résines de polyester stables [28].

Preuve de ses performances, le béton polymère a déjà obtenu de très nombreuses certifications de qualité, auprès d'organismes du bâtiment comptant parmi les plus réputés. Le béton polymère n'est pas un béton traditionnel, même s'il utilise certains matériaux similaires. Soient communs. Il est utilisé pour des projets de construction traditionnels, mais pas uniquement.

Composants polymères lui confèrent plusieurs caractéristiques qui le rendent plus sûr. Il est également plus durable que le béton ordinaire. Le polymère est généralement plus cher. Il est mesuré et plus précisément en termes de densité et de retrait [28].



Figure 1.1: Béton polymère

1.1.2 Composition principale du béton polymère :

Le béton de résine (polymère) est constitué d'un squelette granulaire (les agrégats) et d'un liant polymère (résine), qui est le plus souvent thermodurcissable.[29]

A) Le liant (la résine) :

Les polymères sont des structures dont l'architecture est généralement linéaire ou tridimensionnelle, formées par l'enchaînement covalent de nombreuses unités chimiques répétitives appelées monomères. Ces monomères possèdent une ou plusieurs fonctions chimiques potentiellement réactives. Le nombre et la nature de ces fonctions définissent la fonctionnalité du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons qu'il peut établir avec d'autres monomères lors de la réaction chimique appelée polymérisation.[29]

Ce qui distingue un polymère d'une simple grosse molécule, c'est la répétition régulière de molécules identiques ou similaires qui forment une chaîne ou une portion de chaîne. Les polymères peuvent être constitués d'un seul type de monomère, on parle alors d'homopolymère, comme c'est le cas du polystyrène, ou bien de plusieurs types de monomères.[29]

b) Les agrégats :

Ils forment le squelette du béton et jouent donc un rôle très important dans sa composition et sa fabrication, en particulier dans la fabrication du béton de résine. Ils influencent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini. Dans la plupart des cas, les granulats utilisés sont des sables quartzeux de différentes granulométries. Les graviers (0,2 à 16 mm) et, dans une moindre mesure, les sables (0,1 à 0,7 mm) sont considérés comme des granulats supérieurs, tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites (< 0,1 mm) sont considérées comme des granulats fins. Le choix des granulats est donc crucial pour augmenter le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la résistance à la compression et la dureté.[30]

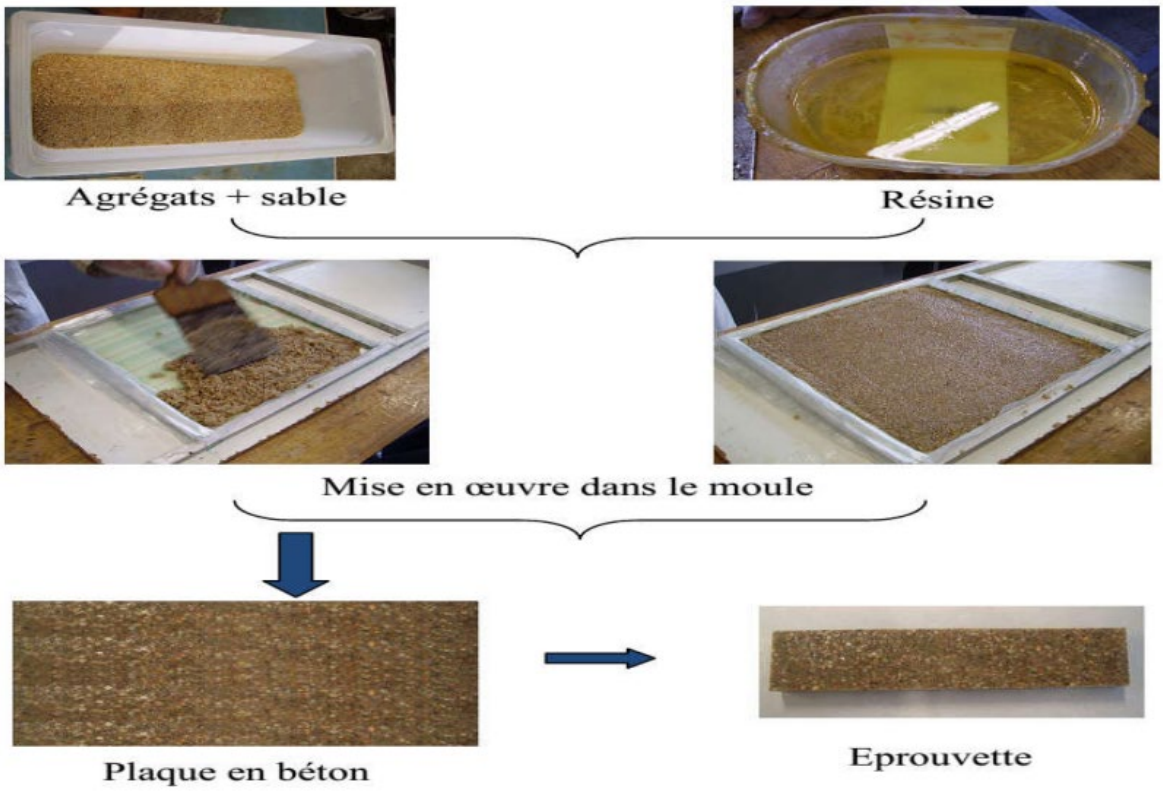


Figure. 1.2: Mise en œuvre d'une plaque de béton polymère. [31]

1.1.3 Les caractéristiques intrinsèques du béton polymère :[28]

- Il offre une résistance totale aux agressions chimiques des effluents, couvrant une large plage de pH de 1 à 14, sans nécessiter de traitement spécifique.
- Il résiste intégralement au sulfure d'hydrogène (H2S) ainsi qu'à de nombreux produits chimiques courants.
- Il présente une résistance complète aux hydrocarbures.
- Son excellent coefficient d'écoulement, avec un indice Manning-Strickler d'environ 108, confère au matériau un comportement auto-curant, ce qui améliore le débit et la performance hydraulique des ouvrages.
- Le béton polymère est totalement étanche dans sa masse grâce à sa très faible porosité de surface, avec une absorption d'eau inférieure à 0,5 %.
- Il possède une excellente résistance à l'abrasion, ce qui permet de conserver les qualités hydrauliques des structures pendant plusieurs décennies.
- Il est insensible aux cycles gel/dégel, grâce à son absence d'eau et à sa faible porosité.
- Sa densité est inférieure à celle du béton classique, ce qui rend les ouvrages plus légers.

- Il résiste aux tags, pouvant être nettoyé sans laisser de traces.
- Il supporte parfaitement l'exposition au sel marin et au sel de déneigement, assurant une durabilité accrue dans les environnements agressifs.

1.1.4 Les types de béton polymère :

a) Béton d'acrylique

Ce béton utilise principalement la résine acrylique polyméthacrylate de méthyle) (PMMA), issue de la polymérisation du méthacrylate de méthyle (MMA). Il est polyvalent, résistant aux intempéries, chimiquement stable, peu perméable et présente un faible retrait (0,01 à 0,1 %) lors de la prise. Son coefficient de dilatation thermique est comparable à celui du béton Portland, ce qui lui confère une excellente résistance aux cycles gel-dégel. Cependant, le MMA a un point d'éclair bas (11°C), posant des contraintes de sécurité. Malgré un coût plus élevé que le béton polyester, ses propriétés exceptionnelles expliquent son usage dans la fabrication d'escaliers, produits sanitaires, bordures de trottoir, plaques de parement, et notamment pour la réparation rapide de gros trous dans les tabliers de ponts. La matrice est obtenue par réticulation du MMA avec du triméthylolpropane tri méthacrylate (TMATMP).[32]

b) Béton de polyester

Le liant le plus courant est un prépolymère de polyester insaturé dissous dans des monomères copolymérisables comme le styrène. La polymérisation se fait par réticulation des doubles liaisons, formant un polymère thermodurcissable. Ce béton offre une bonne résistance mécanique, une bonne adhérence aux matériaux et une bonne résistance chimique et aux cycles gel-dégel. Son principal inconvénient est un retrait important pendant et après la prise, jusqu'à dix fois supérieur à celui du béton Portland. Il est utilisé en construction, en éléments préfabriqués, pour des carreaux, tuyaux d'égout et escaliers.[32]

c) Béton d'époxy

L'époxy est aussi une résine thermodurcissable durcie principalement par des polyamines, mais aussi par des polysulfures ou polyamides. Les bétons d'époxy durcis aux polyamines sont les plus résistants chimiquement. Ceux durcis aux polyamides sont plus flexibles, mieux résistants à la chaleur et moins sujets au farinage, mais moins résistants aux solvants. Les polysulfures augmentent la flexibilité. Ce béton adhère bien, présente un faible retrait, une bonne résistance chimique, au fluage et une bonne durabilité. Son coût élevé limite son usage aux applications où la performance justifie l'investissement : sols industriels, revêtements antidérapants, enduits extérieurs, réparation de surfaces, panneaux translucides, coques de bateaux, carrosseries automobiles.[32]

d) Béton de résine furaniques :

Ces résines sont dérivées de l'alcool furfurolique issu de résidus agricoles (maïs, riz, avoine, bagasse). La réticulation avec du furfuraldéhyde ou du formaldéhyde produit un polymère thermodurcissable très résistant aux solutions acides, basiques et aux solvants puissants (cétones, composés aromatiques ou chlorés). Utilisées comme liant dans des mortiers et coulis, ces résines permettent de réaliser des revêtements de sols résistants aux produits chimiques, aux hautes températures et aux chocs thermiques extrêmes.[33]

1.1.5 Avantages du Béton Polymère :[28]

- Il offre des performances mécaniques supérieures, permettant des ouvrages plus légers et plus fins, ce qui facilite leur manutention et leur mise en œuvre.
- Sa production et livraison sont rapides : il est sec en 20 minutes et atteint sa résistance maximale en 16 heures.
- Il est totalement étanche dans sa masse, assurant une excellente imperméabilité.
- Ce matériau est 100 % recyclable et présente un bilan carbone inférieur à celui du béton traditionnel.
- Il vieillit sans fissuration ni décollement, garantissant une durabilité esthétique sur le long terme.
- Il résiste parfaitement au sel marin, au sel de déverglaçage ainsi qu'aux cycles gel-dégel grâce à son absence d'eau et à son étanchéité parfaite.
- L'absence d'armature métallique élimine tout risque d'éclatement, de chute de morceaux ou de coulures de rouille, assurant un aspect durable.
- Il supporte sans traitement des agressions chimiques variées, avec une résistance sur une large plage de pH (1 à 14), aux sulfures d'hydrogène, à de nombreux acides et hydrocarbures.
- Son excellent coefficient d'écoulement (Manning-Strickler de 108) évite les dépôts et favorise un auto-curage efficace, renforcé par une surface lisse qui limite les accumulations même à faible débit.
- Il présente une excellente résistance à l'abrasion, conservant ses qualités hydrauliques pendant des décennies, compatible avec des vitesses d'écoulement élevées.
- Enfin, il peut être teinté en masse dans une large gamme de couleurs (classification RAL) avec une bonne tenue aux UV sur le long terme.

1.1.6 Les inconvénients du Béton Polymère :[28]

- Le coût des matières premières, notamment du liant, est nettement plus élevé, pouvant atteindre jusqu'à huit fois celui des bétons hydrauliques classiques.
- Il dégage une odeur désagréable et présente une certaine toxicité liée aux résines et durcisseurs utilisés lors du malaxage et de la mise en œuvre.

1.1.7 Les matériaux utilisés :

- Les agrégats utilisent pour la confection du mortier et du béton polymère :
- Sable siliceux :

1.1.7.1 L'analyse granulométrique :

Le sable utilisé dans cette étude (charges minérales) est un sable siliceux normalisé et traité spécialement pour la confection du mortier et de béton polymère. Ce sable est produit par la société Algérienne Adwan Chemicals située à Fornaka, wilaya de Mostaganem.

Les agrégats fins sont constitués d'un sable siliceux de grains très uniformes, normalisé 200-500 µm comme le montre la courbe granulométrique de ce type de sable présenté ci-dessous :

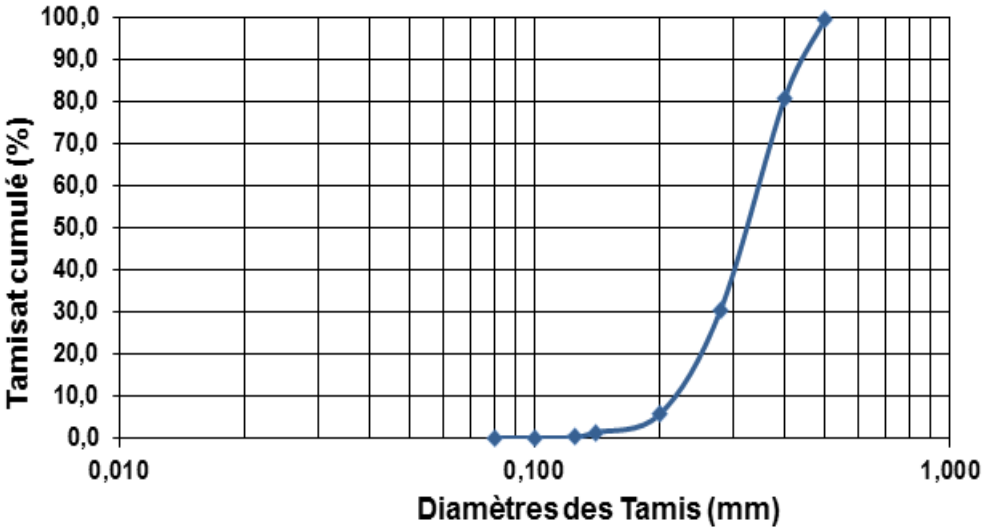


Figure 1.3 : Courbe Granulométrique du sable siliceux

La courbe révèle qu'il s'agit d'un sable uniforme dont la majorité des particules ont une taille comprise entre 0.2 et 0.5 mm ce qui a le caractère d'un sable moyennement fin puisque ses particules ne dépassent pas la valeur de 2 mm de diamètre. La composition chimique présentée sur le tableau ci-dessous montre qu'il est bien un sable de grains majoritairement siliceux :[33]

Tableau 1.1 : composition chimique du sable siliceux

Constituants	(%)
SiO_2	99,02
Al_2O_3	0,769
Fe_2O_3	0,215
MgO	0,006
CaO	0,010
TiO_2	0,078
CuO	0,0002
H_2O	0,02

1.1.7.2 Les Caractéristiques générales des bétons de résine :

Polyester :

- Bonne résistance - Bonne adhésion aux autres matériaux

- Bonne résistance aux produits chimiques et au gel-dégel, mais retrait considérable pendant et après la prise

Époxy :

- Forte adhésion à la plupart des matériaux de construction.

- Faible retrait. - Excellente résistance aux produits chimiques.

- Bonne résistance au fluage.

- Faible sorption

Tableau 1 .2 : propriété de raisine

Propriété	Béton à base de résine polyester	Béton à base de résine époxy
Module de Young (GPa)	3 – 10	5 – 15
Coefficient de Poisson	0.2 - 0.35	0.2 - 0.4

1.2 Définitions des composites :

Un matériau composite se définit comme l'association d'au moins deux matériaux distincts à l'échelle macroscopique, ou de plusieurs matériaux non miscibles mais présentant une forte adhésion entre eux. Cette combinaison aboutit à un assemblage dont les propriétés globales surpassent celles de chacun des composants pris isolément. De manière courante, on désigne sous le terme de « matériaux composites » des structures constituées de fibres renforçant es intégrées dans une matrice dont la résistance mécanique est nettement inférieure. La matrice joue un rôle essentiel en assurant la cohésion et l'orientation des fibres, tout en transmettant les efforts mécaniques appliqués à la pièce. Les matériaux composites ainsi formés sont caractérisés par une forte hétérogénéité et une anisotropie marquée.[34].

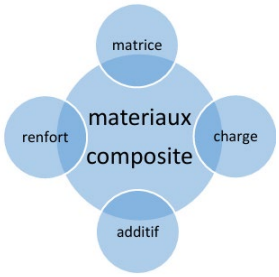


Figure 1.4 : matériau composite.

1.2.1 Constituants des matériaux composites :

1.2.1.1 Renforts :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : Linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus Complexes, tissage tri directionnel ou plus) [2]. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la (Figure I.2)[35]

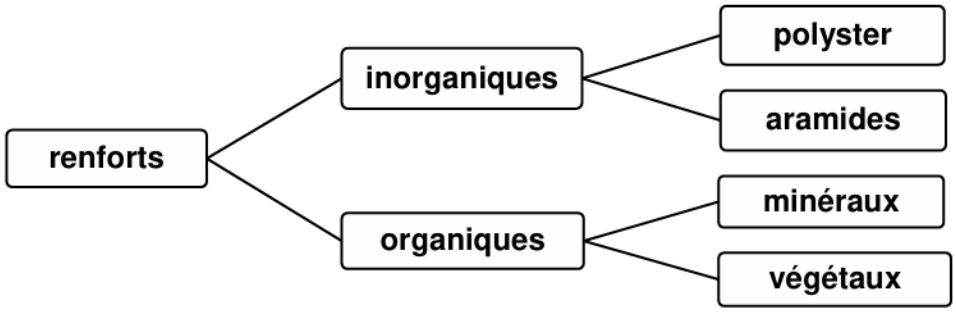


Figure 1.5 : Types de renfort.

Les renforts en fibres se déclinent en plusieurs formes commerciales :

Roving (fils, mèches, etc.) : un roving est un faisceau de fils parallèles assemblés sans torsion.

Tissus (taffetas, toiles, serge, etc.) : ces tissus sont constitués par l'entrecroisement perpendiculaire des rovings. Leur poids peut atteindre jusqu'à 800 g/m².

Mat (à fil coupé ou à fil continu) : le mat est un assemblage de fils coupés ou continus, enduits d'un ensimage plastique, et liés par un liant qui se dissout plus ou moins rapidement dans la résine.[36]

Ces différentes formes permettent d'adapter les renforts aux exigences spécifiques des composites

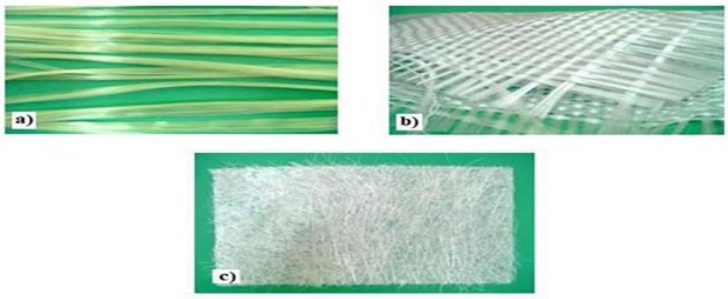


Figure 1.6: les différentes formes des renforts fibres de verre

a) Roving de verre b) Tissu de verre c) Mat de verre

a) Les fibres de verre :

La fibre de verre est un filament très fin, d'environ 10 micromètres de diamètre, fabriqué à partir de silice et d'additifs. Selon leur domaine d'application, les fibres de verre se classent en trois catégories principales : les fibres E, utilisées pour les composites à large diffusion (GD) ; les fibres D, destinées aux applications en construction électrique, notamment les circuits imprimés ; et les fibres R et S, conçues pour les composites à haute performance (HP). Ces fibres constituent le renfort principal dans plus de 95 % des matériaux composites, en particulier ceux destinés à une production de masse. Le verre présente un excellent rapport performance mécanique/prix, en raison de son coût de fabrication relativement bas comparé à d'autres fibres. De plus, la teneur en silice de ces fibres influence leurs propriétés mécaniques ainsi que leur température maximale d'utilisation**.[36]**

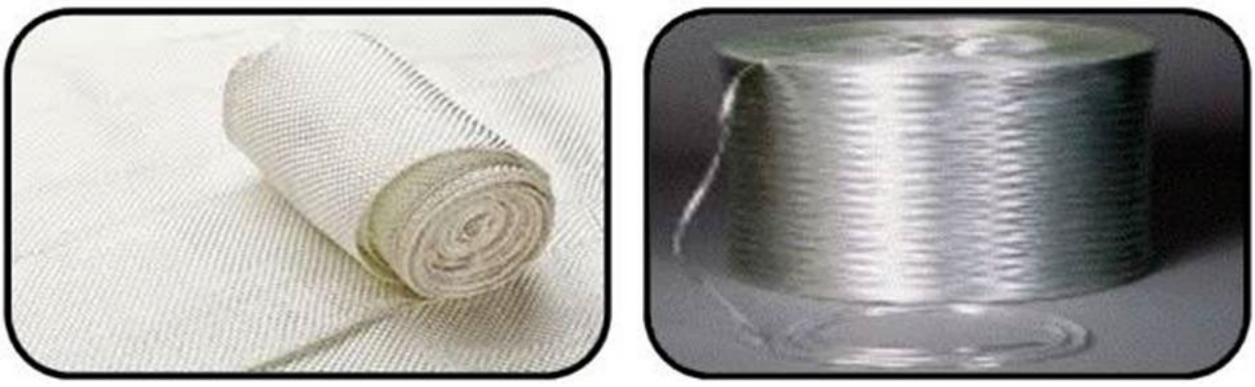


Figure 1.7: Exemple de fibre de verre

b) Les fibres de carbone :

Les fibres de carbone sont apparues au cours du siècle dernier et étaient initialement extraites de matières organiques naturelles. Aujourd'hui, elles sont principalement fabriquées à partir de fibres inorganiques obtenues par carbonisation de fibres polymères tressées appelées PAN (polyacrylonitrile). Ces fibres ont un diamètre moyen d'environ 7 à 8 micromètres et sont constituées majoritairement d'atomes de carbone disposés en cristaux microscopiques suivant une structure hexagonale, ce qui confère à la fibre une résistance exceptionnelle. Plusieurs milliers de ces fibres sont regroupées pour former un fil, utilisable directement ou sous forme de tissu.

On distingue les fibres de carbone contenant entre 90 et 98 % de carbone, des fibres de graphite dont la teneur dépasse 99 %. Ces deux types présentent une très haute résistance à la traction et un module d'élasticité élevé, ce qui les rend adaptés à la fabrication de matériaux composites à matrice polymère (PRF) de haute performance. La cuisson des fibres permet de contrôler précisément leurs propriétés mécaniques finales, notamment leur résistance et leur module d'élasticité [37]

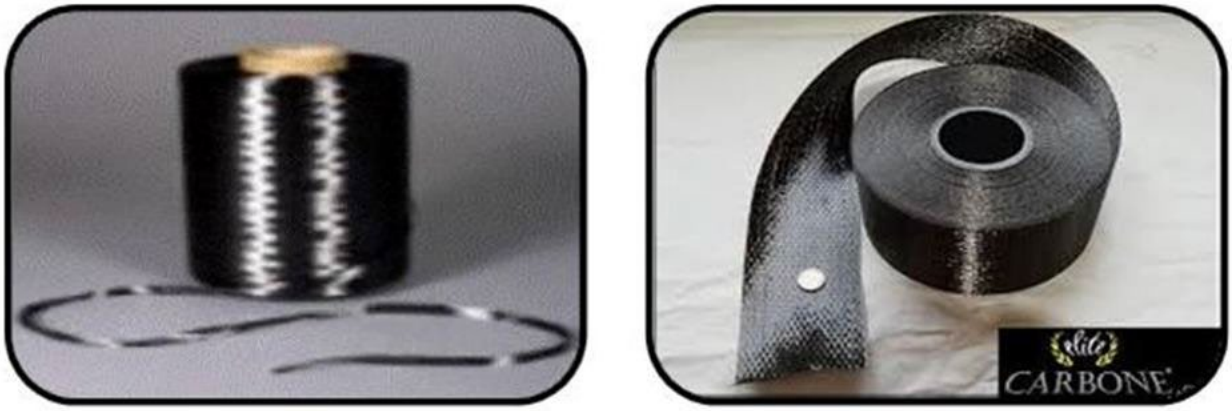


Figure1.8: différents types des fibres de carbone

C) Fibres d'Aramides :

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression sont faibles. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisé. L'appellation commerciale des fibres d'aramide est le Kevlar qui est une marque d'origine de la compagnie Dupont De Nemours. Elles sont, par ailleurs, très utilisées dans l'industrie pneumatique.[38]

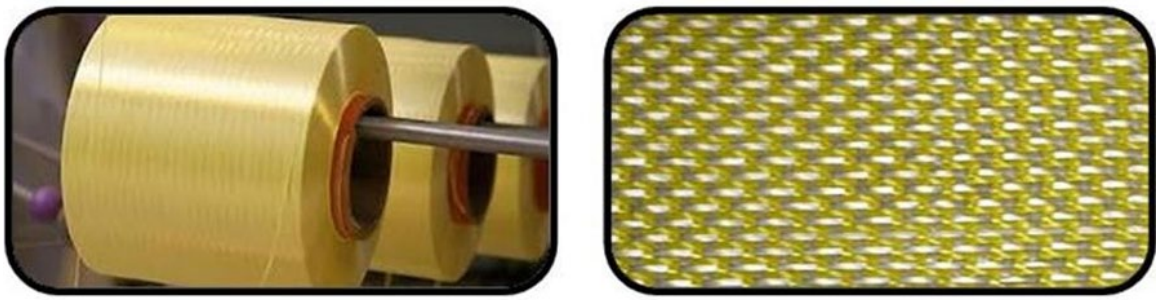


Figure 1.9 : Exemple de fibre d'aramide

Les fibres d'aramide sont en général très résistantes et ont un module d'élasticité très élevé. On distingue deux types de fibres d'aramide **[39]** : le Kevlar 29 et le Kevlar 49. Le type 29 est utilisé surtout pour la fabrication de FRP alors que le second sert à confectionner des câbles et des cordes.

Parmi ces fibres nous avons :

1. **Les fibres d'origine végétale**, telles que le bois utilisé sous forme de fibres orientées, le sisal, le jute, le lin, etc.
2. **Les fibres synthétiques**, telles les fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.), les fibres polyamides, les fibres polyéthylène, les fibres polypropylène, etc.
3. **Les fibres métalliques**, comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique et leurs caractéristiques thermomécaniques élevées.

1.2.1.2 Les matrices :

Le terme matrice fait référence à la substance solide qui enveloppe les renforts pour constituer une masse compacte. La matrice a pour principal objectif de garder les renforts dans une forme condensée tout en assurant la forme désirée du produit fini. Aussi, il est question de protéger les fibres face à l'abrasion et un milieu agressif, de surveiller l'aspect de la surface et d'assurer le passage des charges entre les fibres. Le matériau constituant la matrice peut être de nature métallique, céramique ou polymère [28].

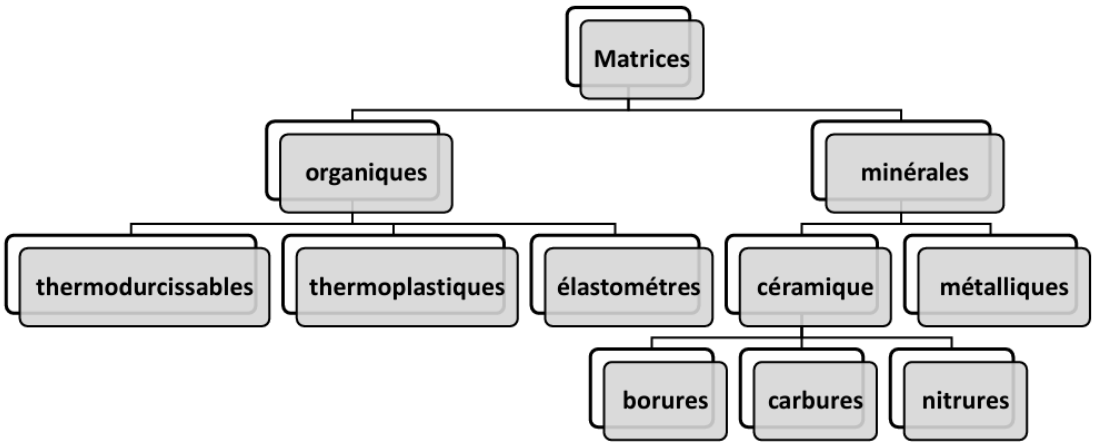


Figure 1.10 : Différent type des résines.

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

A- Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables couramment utilisées aujourd'hui comprennent plusieurs types aux caractéristiques distinctes :

- Polyesters insaturés : Ce sont les résines les plus répandues. Elles résultent de la combinaison d'un polyacide et d'un polyalcool, qui durcissent sous l'effet d'un catalyseur et de la chaleur. Leur principal inconvénient est l'émission de vapeurs de styrène lors de la polymérisation, ainsi que des difficultés de stockage.
- Vinylesters : Variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique, elles offrent une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, mais restent combustibles.
- Résines époxy : Considérées comme la référence dans les composites, elles assurent une excellente adhésion, une faible rétraction et une grande résistance chimique.
- Résines phénoliques : Issues de la polycondensation du phénol et du formol, elles se caractérisent par une très bonne résistance au feu sans dégagement de fumée, ce qui explique leur usage dans le ferroviaire. Cependant, elles sont fragiles, sensibles à l'humidité et difficiles à mettre en œuvre.
- Polyuréthannes : Leur faible viscosité facilite un remplissage efficace des moules, ce qui est un avantage lors de la fabrication.

Ces résines thermodurcissables sont choisies selon les exigences spécifiques des applications, notamment en termes de résistance mécanique, chimique, thermique et de facilité de mise en œuvre.**[34]**

B) Résines EPOXYDES :

Les résines époxydes sont dotées de plusieurs performances : Dureté, rigidité, propriétés thermiques élevées, résistance chimique, adhésion très forte, réaction avec une grande variété d'agents de durcisseurs chimiques. Ces résines forment des réseaux très réticulés ayant une grande rigidité et une température de transition vitreuse élevée avec une résistance chimique très grande.[41]



Figure 1.11: La résine époxy

C)Résine Polyester :

La résine Polyester insaturée est un polymère thermodurcissable à thermo fixation nécessitant l'ajout d'un accélérateur pour initier la réaction chimique de polymérisation qui finit par le durcissement de la résine. La plupart de ce type de résines ont une couleur pâle, visqueuse et sont obtenues du mélange de polyester et de styrène. Celui-ci a le rôle de dilution de la résine pour qu'elle soit facilement utilisable et durcis sable. La résine polyester offre un rapport excellent qualité/prix par rapport à la résine époxyde qui est beaucoup plus chère. Elle est la plus utilisée dans les composites lorsque le renforcement de la matrice est assuré par des fibres cellulosique [42]

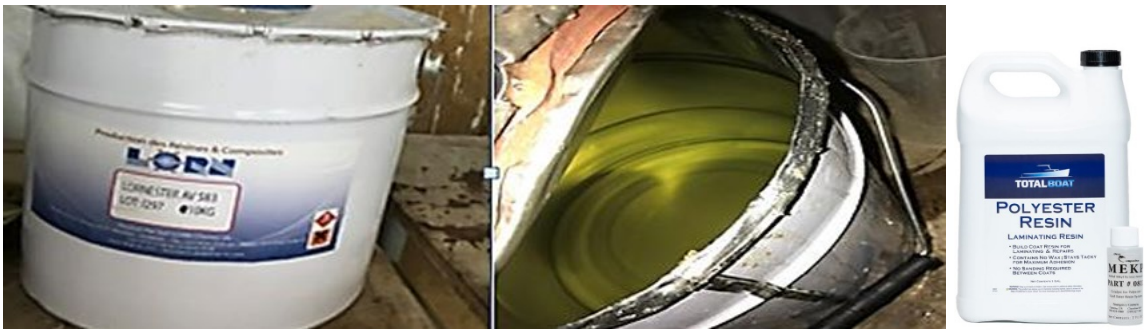


Figure 1.12: La résine polyester insaturée

1.2.2 Matériaux composites structuraux :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

1.2.2.1 Monocouches :

Représentent l'élément de base de la structure composite (Figure I.6). 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.[43]

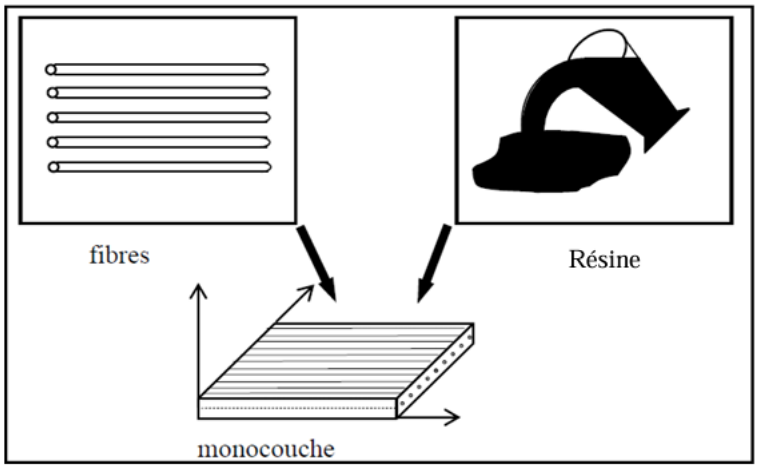


Figure 1.13 Constitution d'une structure composite monocouche

1.2.2.2 Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués (figure 1.14) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Nous examinons les divers types de stratifiés [44]

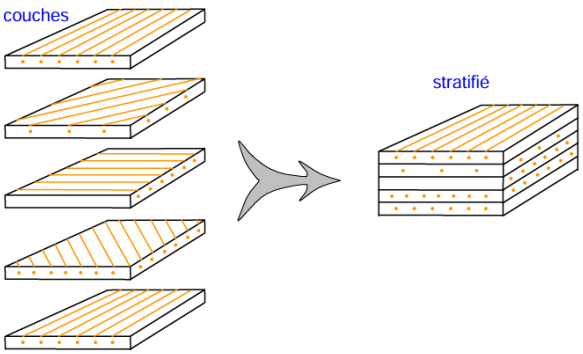


Figure 1.14 : Constitution d'un stratifié.[40]

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Équilibré : stratifié comprenant un nombre égal de couches orientées dans la direction +θ et de couches orientées dans la direction -θ.
2. Symétrique : stratifié qui présente des couches disposées de manière symétrique par rapport à un plan central.
3. Orthogonal : stratifié ayant un nombre égal de couches à 0° et à 90°.

1.2.2.3 Les sandwichs :

Un matériau sandwich est constitué de trois couches, elle se compose de deux peaux fines, liées à un cœur léger et épais (Figure I.1). Les deux peaux sont rigides et le cœur est relativement faible et souple, mais lorsqu' ils sont combinés sous forme de structure sandwiche, ils produisent une structure rigide, solide et très légère. Les trois parties du sandwich sont liées par un film d'adhésif, la liaison entre deux couches successives est appelée l'interface. Ces couches peuvent être de nature différente, d'où la complexité de ces structures à cause de grands nombres des matériaux susceptibles d'être employés [43], [45].

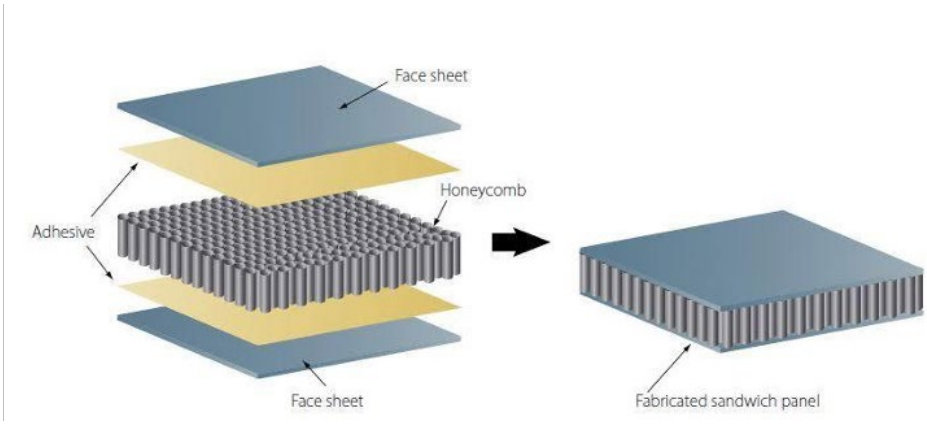


Figure 1.15: schématisation d'une sandwiche [40]

A- Les peaux :

Dans une structure sandwiche les peaux peuvent être réalisés en plusieurs matériaux différents, un matériau isotrope, orthotrope ou un matériau composite. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. L'aluminium, fibre de verre, graphite et l'aramide sont les matériaux les plus utilisées dans les semelles. Cependant, pour minimiser le poids de la structure on préfère généralement des peaux en matériaux composites. . Le schéma général d'un matériau pour peaux est donné parla (Figure 1.16)

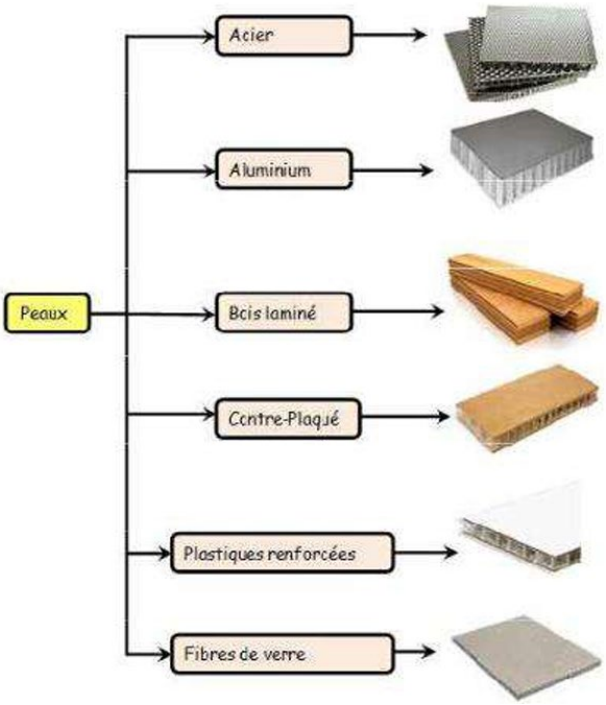


Figure 1.16: Matériaux pour les peaux [40]

B- L'âme :

Cette âme, qui sépare les peaux en gardant leur distance relative constante, permet d'augmenter notablement le moment d'inertie de la structure, et donc sa rigidité tout en conservant une masse spécifique minimale.

Le sandwich est destiné à résister au flambement et à d'éventuelles contrainte de poinçonnement. Dans ces conditions, l'âme doit posséder une bonne résistance à la compression et au cisaillement. Les matériaux de l'âme, les plus utilisées se présentent principalement sous deux formes [40] :

Âme pleine : parmi lesquelles on retrouve :

- Le balsa ou bois cellulaire,
- Diverses mousses cellulaires,
- Des résines chargées de micro sphères de verres appelés mousses syntactiques,

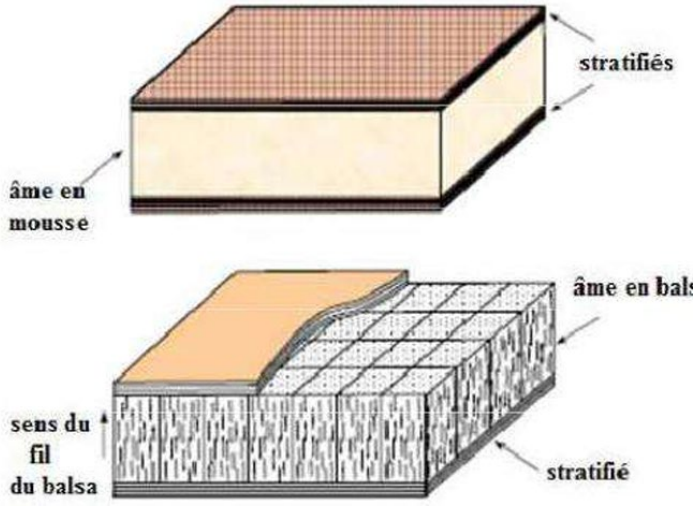


Figure 1 .17 : Matériaux sandwiches à âmes pleines.

b. âme creuses : essentiellement en nid d'abeilles et profilés parmi lesquelles on retrouve :

- Des maillages métalliques légers,

- Du papier kraft (enduit ou non de résine phénolique),

- Du papier polyamide, type papier Nômes (fibres aramide).

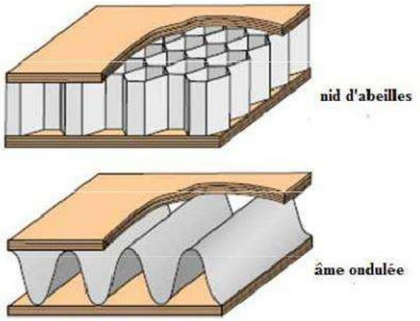


Figure 1.18: Matériaux sandwichs à âmes pleines

C- L'adhésif de l'interface :

L'interphase des composites correspond à la zone de contact entre la fibre et la matrice, ainsi qu'à une région environnante de volume limité dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant à part entière du composite, car elle présente des propriétés chimiques, physiques et mécaniques distinctes de celles de la fibre et de la matrice. Cette interphase assure la liaison entre la fibre et la matrice, permettant ainsi le transfert des contraintes sans qu'il y ait de déplacement relatif entre les deux. Toutefois, pour simplifier l'analyse micromécanique des composites, on suppose souvent que l'interphase est dépourvue d'épaisseur.[46]

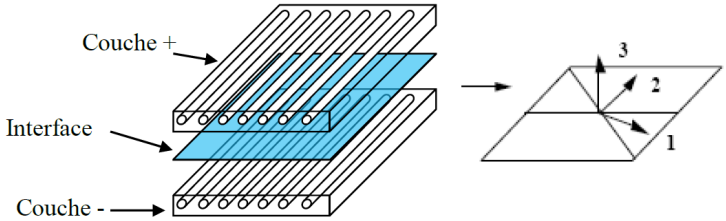


Figure 1.19: Interface

1.3 Élaboration des composites à matrice organique :

Le matériau composite ne devient pleinement résistant qu'après le durcissement final de la matrice, généralement par polymérisation dans le cas des résines. Une fois durci, il est impossible de modifier la structure du composite, contrairement aux alliages métalliques qui peuvent être retravaillés par traitement thermique.[47]

La fabrication des composites à matrice organique repose sur plusieurs procédés de moulage adaptés à la nature de la pièce et aux performances attendues. Les principaux procédés sont :

1.3.1 Moulage sans pression:

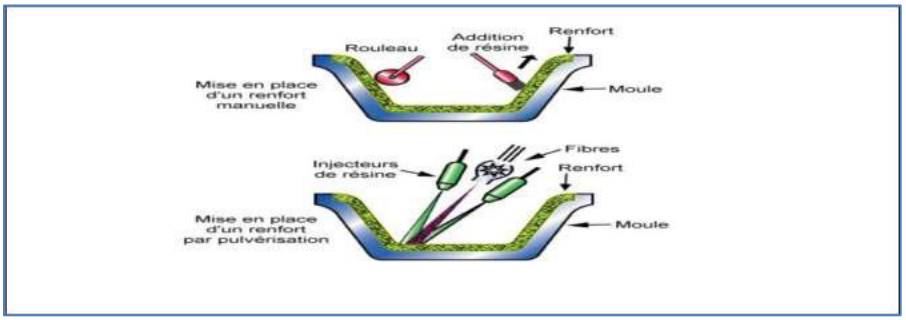


Figure 1.20: Moulage en contact

- Hand lay-up : Le moule est enduit de résine, puis des couches de fibres (verre, carbone) sont déposées manuellement et imprégnées de résine, couche par couche, avec un laminage pour assurer une bonne répartition.
- Spray-up (pistolage) : Résine et fibres coupées sont mélangées et pulvérisées simultanément dans le moule, adapté aux grandes pièces avec une forte proportion de renfort.

1.3.2 Moulage sous vide:

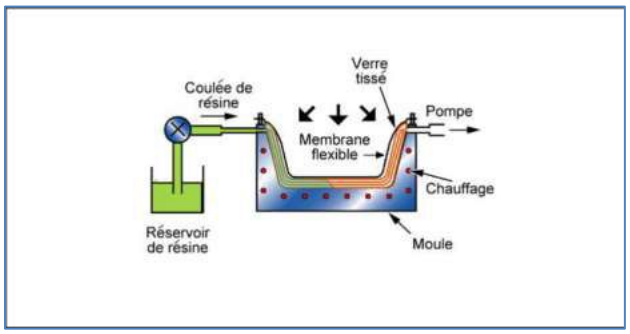


Figure 1.21 :Moulage sous vide ou au sac

Le renfort sec est placé dans un moule, recouvert d'un film de démoulage puis enfermé dans un sac sous vide. La résine est aspirée dans le sac, imprégnant les fibres avant polymérisation. Ce procédé permet de réduire les coûts d'outillage et d'obtenir des pièces complexes et de bonne qualité.

1.3.3 Moulage par compression :

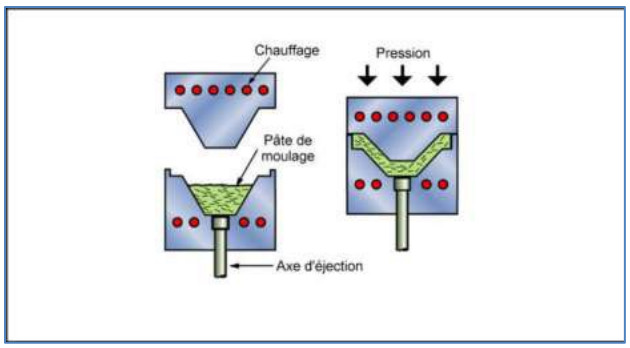


Figure 1.22 : Moulage par compression

Utilisé notamment avec des compounds préimprégnés (BMC), ce procédé consiste à placer une préforme dans un moule chauffé, puis à appliquer une pression (0,5 à 15 MPa) pour former la pièce finale. C'est une méthode économique pour la production en série de pièces de petites et moyennes dimensions.[47]

1.3.4 Moulage par enroulement filamentaire :

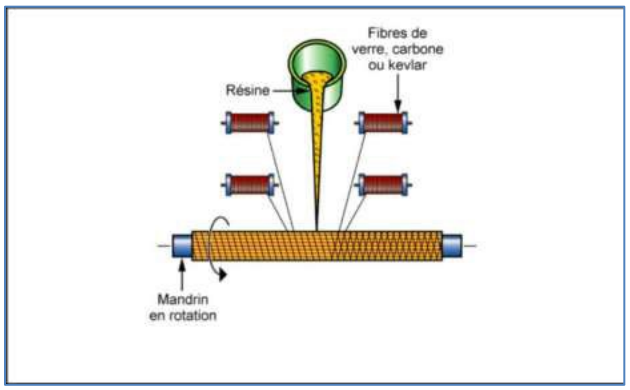


Figure 1.23: Moulage par enroulement filamentaire

Des fibres imprégnées de résine sont enroulées sur un mandrin rotatif selon différents schémas (circonférentiel, hélicoïdal, polaire) pour fabriquer des pièces à symétrie axiale, comme des tubes ou réservoirs.

1.3.5 Moulage par projection :

La résine catalysée et les fibres coupées sont projetées simultanément sur une forme à l'aide d'un pistolet. Ce procédé est rapide et adapté à la fabrication de pièces aux formes variées.

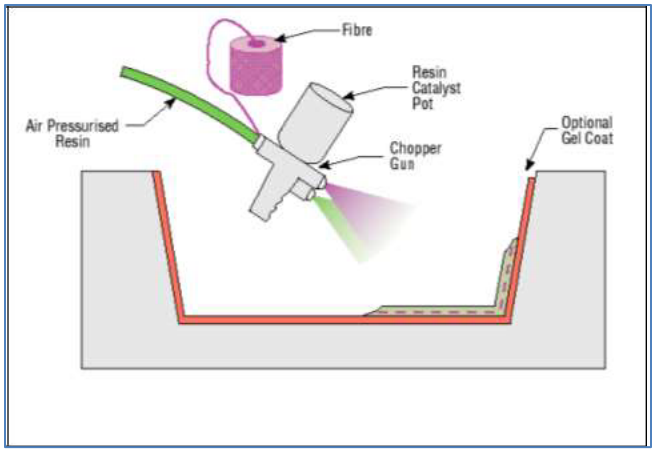


Figure 1.24 *:* Moulage par projection

Ces procédés permettent de disposer les fibres selon les contraintes mécaniques attendues et d'assurer une bonne imprégnation et durcissement de la matrice, garantissant ainsi les performances mécaniques du composite final [40]

CHAPITRE 2

Comportement mécanique des matériaux composites et sandwichs

2.1 L'élasticité dans les matériaux composites

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu. Ces lois sont décrites par axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés, pour une température donnée, de nombreux milieux solides déformables ont un comportement élastique linéaire [40].

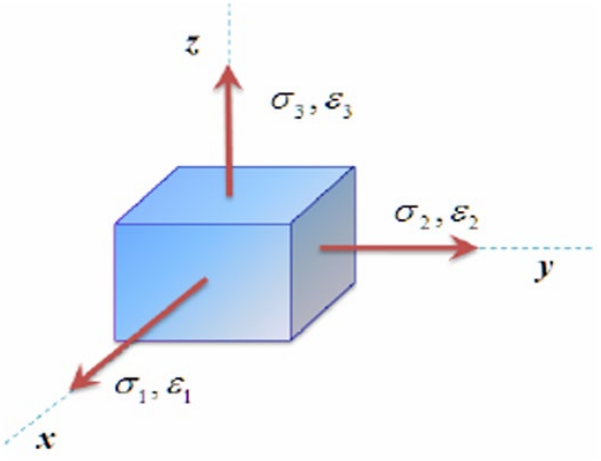


Figure 2.1 Définition des contraintes et déformations en 3D

2.1.1 Matrice de rigidité

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \qquad [2.1]$$

Sous forme condensée

$$\sigma = C\,\varepsilon \qquad [2.2]$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduite la matrice de rigidité *C*, symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc, décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants, ici, les 21 constantes de rigidité *Cij*.

2.1.2 Matrice de flexibilité (souplesse)

La relation précédente peut être écrite sous la forme inverse :

$$\varepsilon = S\,\sigma \qquad [2.3]$$

La matrice *S* est appelée matrice de flexibilité ou matrice de souplesse, et s'écrit dans le cas général :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

Avec $S = C^{-1}$ [2.5]

Les coefficients S_{ij} sont appelés constantes de flexibilité ou constantes de souplesse.

Lois de comportement des composites : La relation d'élasticité linéaire reliant la matrice de rigidité à celle de déformation peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma = C.\varepsilon: \quad [2.6]$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad [2.7]$$

La loi de Hooke généralisée, introduit une matrice de rigidité symétrique, constituée dans le cas général de 21 constantes de rigidité Cij.

2.2 Types de matériaux

2.2.1 Matériaux anisotropes

Dans le cas le plus général, la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique. La plupart des matériaux anisotropes possèdent une structure présentant une ou plusieurs symétries. Les propriétés de symétries géométriques réduisent alors le nombre des constants indépendants nécessaires pour décrire le comportement du matériau. Cette réduction est fonction des symétries présentées par le matériau considéré.

2.2.2 Matériau monoclinique :

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie. La forme de la matrice de rigidité (souplesse) doit être telle qu'un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifie pas la matrice. Dans le cas où le plan de symétrie est le plan (2.1), l'exploitation des changements de base conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad [2.8]$$

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est réduit à 13

2.2.3 Matériau orthotrope :

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie perpendiculaires deux à deux. Il est à noter l'existence de deux plans de symétrie perpendiculaires, implique l'existence du troisième. La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad [2.9]$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

2.2.4 Matériau Unidirectionnel

Le matériau se comporte donc comme un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution. Le matériau est appelé matériau orthotrope de révolution ou *isotrope transverse*. Il en résulte qu'un changement de base effectué par rotation quelconque autour de cet axe doit laisser inchangée la matrice de rigidité (souplesse). L'exploitation de cette propriété conduit à la matrice :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22}-C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad [2.10]$$

Et la matrice de souplesse :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22}-S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad [2.11]$$

Les propriétés du matériau unidirectionnel sont déterminées par 5 constantes d'élasticité indépendantes.

2.2.5 Matériau isotrope :

C'est un matériau qui ne possède aucune direction privilégiée et ses propriétés sont indépendantes du choix de l'axe de référence. Dans ce cas le nombre de constantes indépendantes vaut seulement deux. La matrice de rigidité d'un tel matériau est donnée par :

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad [2.12]$$

2.3 Comportement élastique d'un matériau composite orthotrope

Dans le cas d'un matériau orthotrope, la loi de Hooke s'écrit en utilisant soit la matrice de rigidité soit la matrice de souplesse comme suit :

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & & 0\\ 0 & 0 & 0 & & C_{55} & 0\\ & & & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \quad \text{Ou} \quad \begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & & 0\\ 0 & 0 & 0 & & S_{55} & 0\\ & & & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix}$$

[2.13]

On constate que le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est donc caractérisé par 9 coefficients indépendants. Les relations montrent que :

- 3 modules d'Young : E_1, E_2, E_3,
- 3 coefficients de Poisson : ν_{12}, ν_{13}, ν_{23},

3modules de cisaillement : G_{12}, G_{13}, G_{23}

[2.14]

En tenant compte des expressions présentées dans le tableau, la loi de Hooke s'écrit en utilisant la soit la matrice de souplesse comme suit :

$$[S]=\begin{bmatrix}(1/E_1) & -(\nu_{12}/E_1) & -(\nu_{13}/E_1) & 0 & 0 & 0\\ -(\nu_{12}/E_1) & (1/E_2) & -(\nu_{23}/E_2) & 0 & 0 & 0\\ -(\nu_{13}/E_1) & -(\nu_{23}/E_2) & (1/E_3) & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & (1/G_{23}) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1/G_{13}) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1/G_{12})\end{bmatrix} \qquad [2.15]$$

Où ν_{ij} est le coefficient de Poisson transversal dans la direction i par rapport à la déformation de compression longitudinale dans la direction j. c à d :

$$\nu_{ij}=-\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \qquad [2.16]$$

Le coefficient de Poisson n'est pas symétrique dans ses indices, et la symétrie de la matrice de Souplesse mène à la relation suivante :

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i}=\frac{\nu_{ji}}{E_j} \qquad [2.17]$$

En inversant la matrice de souplesse, la matrice de rigidité en fonction des modules de l'ingénieur s'écrit :

$$[C]=\begin{bmatrix} (1-\nu_{23}\nu_{32})/E_2E_3\Delta & (\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32})/E_2E_3\Delta & (\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23})/E_2E_3\Delta & 0 & 0 & 0 \\ (\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31})/E_1E_3\Delta & (1-\nu_{13}\nu_{31})/E_1E_3\Delta & (\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13})/E_1E_3\Delta & 0 & 0 & 0 \\ (\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32})/E_1E_2\Delta & (\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31})/E_1E_2\Delta & (1-\nu_{12}\nu_{21})/E_1E_2\Delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad [2.18]$$

Avec :

$$\Delta=\frac{(1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31})}{E_1E_2E_3} \quad [2.19]$$

2.3.1 Relations d'élasticité dans un système d'axes quelconque

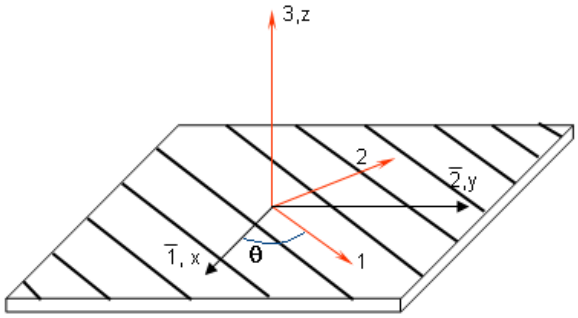


Figure 2.2 Axes principaux $(1,2,3)$ et axes de référence $(\bar{1},\bar{2},3)=(x,y,z)$ d'une couche de stratifié

Le comportement élastique d'une couche, rapporté à ses axes principaux, est donné par les relations [1.6] et [1.9] pour une couche unidirectionnelle. Les matrices de rigidité $\bar{C}$ et de souplesse $\bar{S}$ exprimées dans la base $(\bar{1},\bar{2},3)$ sont obtenues en appliquant aux matrices de rigidité et souplesse, rapportées à la base $(1,2,3)$, les relations de changement de base suivantes :

$$\begin{aligned} [\bar{C}] &= [T_\sigma]^{-1}[C]\,[T_\varepsilon] \\ [\bar{S}] &= [T_\varepsilon]^{-1}[S]\,[T_\sigma] \end{aligned} \quad [2.20]$$

Avec :

T_ε : La matrice de changement de base des déformations :

$$[T_\varepsilon]=\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -2\sin\theta\cos\theta & 2\sin\theta\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \quad [2.21]$$

T_ε : La matrice de changement de base des contraintes :

$$[T_\sigma]=\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & 2\sin\theta\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \quad [2.22]$$

2.3.2 Equations d'élasticité pour un état de contraintes planes

Dans le cas de la théorie des stratifiés, on est amené à considérer un état de contrainte plane défini par :

$$\bar{\sigma}(M)=\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [2.23]$$

Soit :

$$\begin{aligned} &\bar{\sigma}_{ij}\neq 0 \quad si \quad i=1,2,6 \\ &\bar{\sigma}_{ij}=0 \quad si \quad i=3,4,5 \end{aligned} \quad [2.24]$$

Dans ce cas, les relations d'élasticité peuvent être expliquées à partir de la matrice de rigidité réduite Q du matériau :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{66} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{66} \end{Bmatrix} \quad [2.25]$$

Où les constantes de rigidité réduites s'expriment en fonction des rigidités par :

$$\begin{aligned} &Q_{11}=C_{11}-\frac{C_{13}^2}{C_{33}} \qquad Q_{22}=C_{22}-\frac{C_{23}^2}{C_{33}} \\ &Q_{12}=C_{11}-\frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \quad Q_{66}=C_{66} \end{aligned} \quad [2.26]$$

Les expressions des constantes de rigidités réduites en fonction des modules d'élasticité dans les axes principaux sont données par :

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \frac{E_L}{E_T}\nu_{LT}^2} \quad , \qquad Q_{22} = \frac{E_T}{E_L} Q_{11}$$
$$Q_{12} = \nu_{LT} Q_{11} \quad , \qquad Q_{66} = G_{LT} \qquad [2.27]$$

2.3.3 Constantes de rigidité réduites en dehors de ses axes principaux

La relation d'élasticité en contraintes planes s'écrit dans le système d'axe (x, y, z) suivant

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \qquad [2.28]$$

Les expressions de rigidité réduites en dehors de ses axes principaux sont :

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= Q_{11}\cos^4\theta + Q_{22}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{12}(\cos^4\theta + \sin^4\theta) \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})\cos\theta\sin^3\theta \\
\bar{Q}_{22} &= Q_{11}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{22}\cos^4\theta \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\cos\theta\sin^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta \\
\bar{Q}_{66} &= [Q_{11} + Q_{22} - 2(Q_{12} + Q_{66})]\cos^2\theta\sin^2\theta + Q_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)
\end{aligned} \qquad [2.29]$$

Le comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux sandwichs est généralement analysé par la théorie des plaques sandwichs [41]. Elle est basée sur la théorie des stratifiés prenant en compte le cisaillement transverse qui considère qu'une normale au plan moyen d'un stratifie reste un segment de droite lors de la déformation, mais ne reste toutefois pas normale au plan moyen. La théorie des plaques sandwichs considère que seule l'âme du matériau sandwich est soumise à une déformation de cisaillement transverse. La théorie des stratifies avec cisaillement transverse et la théorie des plaques sandwichs sont les outils qui peuvent être utilises usuellement pour analyser le comportement élastique des structures en matériaux sandwichs [49].

2.4 La théorie adaptée en flexion des poutres sandwichs

Un matériau sandwich est constitué d'une âme de faible masse volumique sur lequel sont collées deux peaux à rigidité et résistance élevées. La fonction essentielle de l'âme du sandwich est de transmettre par cisaillement transverse, les actions mécaniques d'une peau à l'autre. Les peaux peuvent être constituées par des matériaux métalliques ou plus généralement par des stratifies d'épaisseur h1 (peau

inferieure) et d'épaisseur h2 (peau supérieure) (figure 2.3). 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 [41].

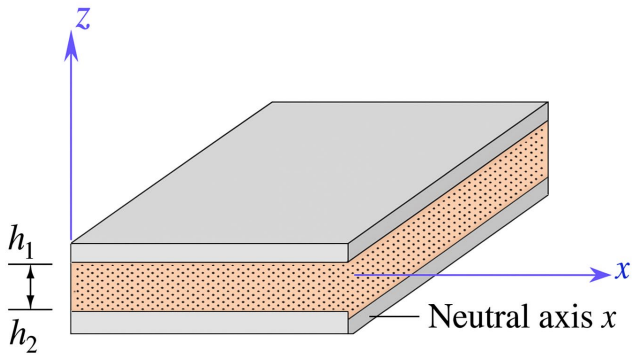


Figure 2.3 : poutre sandwich

2.4.1 Hypothèses de la théorie des plaques sandwichs :

La théorie des plaques sandwichs est basée sur les hypothèses suivantes [40]:

1. L'épaisseur de l'âme est bien plus élevée que celle des peaux (h>>h1, h2).

2. Les déplacements de l'âme ua et va suivant les directions x et y sont des fonctions linéaires de la coordonnée z. 3. Les déplacements u et v suivant les directions x et y sont uniformes dans l'épaisseur des peaux.

4. Le déplacement transverse w est indépendant de la variable z : la déformation εzz est négligée.

5. L'âme ne transmet que les contraintes de cisaillement transverse, σyz : les contraintesσxx, σyy , σxy et σzz sont négligées.

6. Les contraintes de cisaillement transverse σxz et σyz sont négligées dans les peaux.

Enfin la théorie traite les problèmes d'élasticité en faibles déformations.

Champ des déplacements

Le déplacement élastique de tout point du stratifie bidimensionnel plan, dans le plan x, y du stratifié. Il a alors pour composantes : u_0 , v_0 .

Champ des déformations

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial x} \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} \qquad [2.30]$$

Le champ des résultantes en membrane en fonction des contraintes, est défini par :

$$N(x,y)=\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}=\sum_{k=1}^{n}\int_{h_{k-1}}^{h_k}\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \qquad [2.31]$$

Soit en fonction des déformations :

$$N(x,y)=\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}=\sum_{k=1}^{n}\int_{h_{k-1}}^{h_k}\begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_k dz \qquad [2.32]$$

2.4.2 Equations Constitutives

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée à symétrie miroir exprime les résultantes en fonction des déformations en membrane.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad [2.33]$$

Avec :

$$A_{ij}=\sum_{k=1}^{n}\left(h_k-h_{k-1}\right)\left(\bar{Q}_{ij}\right)_k \qquad [2.34]$$

On constate sur les expressions ci-dessus que les coefficients A_{ij} sont indépendants de l'ordre d'empilement des plis. On peut voir également que les résultantes d'efforts normaux *Nx* ou *Ny* engendrent des distorsions angulaires. Ce couplage disparaît si le stratifié est équilibré.

Les coefficients $\bar{Q}_{16}$ et $\bar{Q}_{26}$ sont antisymétriques en θ et donc s'éliminent pour les paires de plis à $\pm\theta$ lorsqu'on calcule les termes A_{16} et A_{26}. Il en résulte qu'alors :

$$A_{16}=A_{26}=0 \qquad [2.35]$$

Et la loi de comportement du stratifié se réduit à :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad [2.36]$$

2.4.3 Modèle bidimensionnel d'une poutre en flexion simple

La théorie des poutres simples est adaptée aux poutres sandwiches, avec quelques modifications mineures. L'utilisation de cette théorie permet de trouver une méthode simple permettant de calculer la rigidité en flexion, la rigidité en cisaillement, les contraintes dans les peaux et la contrainte de cisaillement dans l'âme.

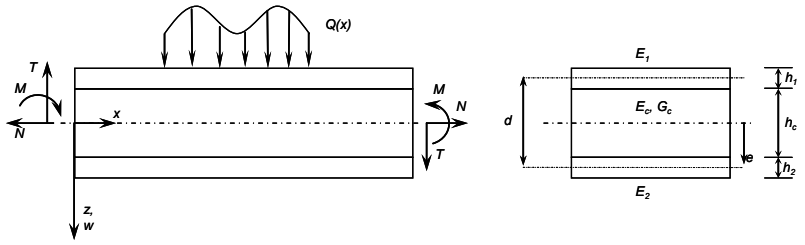


Figure 2.4. Poutre sandwich chargée dans son plan.

2.4.4 Rigidité en flexion

Dans le cas général, la répartition des sollicitations dans une structure sandwich est décrite comme sur la Figure 2.4 Dans cette étude on suppose que la poutre sandwich est soumise uniquement, à un moment de flexion M_x et une force transversale T_x. La déformation à une distance z par rapport à l'axe neutre de sandwich est donné par :

$$\varepsilon_x = \frac{M_x z}{D} \qquad [2.37]$$

D : désigne la rigidité en flexion du sandwich, et s'écrit :

$$D = \int Ez^2 dz = \frac{E_1 b h_1^3}{12} + \frac{E_2 b h_2^3}{12} + \frac{E_c b h_c^3}{12} + E_1 b h_1 \left(d - e\right)^2 + E_2 b h_2 e^2 + E_c b t_c \left(\frac{h_c + h_2}{2} - e\right)^2 \qquad [2.38]$$

Avec $e=d/2$

h_f, d, e et le module d'élasticité E_f sont ceux représentés dans la Figure 1.11. Dans le cas d'un sandwich à peaux fines, les deux premiers termes du second membre peuvent être négligés et même le troisième et le sixième terme pour une âme à module d'élasticité faible.

Pour un sandwich symétrique (même épaisseur et matériau) $h_1=h_2=h_f$, $E_1=E_2=E_f$, l'équation [2.38] devient :

$$D = \frac{E_f b h_f^3}{6} + \frac{E_f b h_f d^2}{2} + \frac{E_c b h_c^3}{12} \qquad [2.39]$$

Dans cette étude, la position de l'axe neutre est celle qui vérifie la condition suivante :

$$\int \sigma_x dz = 0 \qquad [2.40]$$

Pour une intégration sur la totalité de la section transversale, la rigidité est donnée :

$$E_1 t_1\left(\frac{h_1}{2}+h_c+\frac{h_2}{2}\right)+E_c h_c\left(\frac{h_c}{2}+\frac{h_2}{2}\right)=e\left[E_1 h_1+E_c h_c+E_2 h_2\right] \quad [2.41]$$

- *Contraintes normales dans les peaux*

Pour un sandwich symétrique, la position de l'axe neutre est au milieu du cœur. Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux peuvent être calculées en utilisant l'équation 1.41 :

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = E\frac{M_x z}{D} \quad [2.42]$$

- *Contrainte de compression dans la peau supérieure :*

$$\sigma_1 = -E_1\frac{M_x(d-e)}{D} \approx -\frac{M_x}{h_f bd} \quad [2.43]$$

- *Contrainte de traction dans la peau inférieure :*

$$\sigma_2 = \frac{M_x e}{D}E_2 \approx +\frac{M_x}{h_f bd} \quad [2.44]$$

La contrainte de cisaillement est calculée en utilisant une définition plus générale de l'équation d'équilibre.

$$\frac{d\sigma_x}{dx}+\frac{\tau_{xz}}{dz}=0 \rightarrow \tau_{xz}(z)=\int_z^{(d+h_f)/2}\frac{d\sigma_x}{dx}dz \quad [2.45]$$

Sachant que τ_{xz} est nulle pour $z=\frac{d}{2}+h_f$, et en utilisant $\frac{dM_x}{dx}=T_x$, l'équation [1.64] devient :

$$\tau_{xz}=\frac{T_x}{D}\int_z^{(d+h_f)/2}Ezdz=\frac{T_x B(z)}{D} \quad [2.46]$$

Avec $B(z)$ est le moment surfacique d'ordre 1, calculé par :

$$B(z)=\int_z^{(d+h_f)/2}Ezdz \quad [2.47]$$

- *Contraintes de cisaillement dans les peaux*

Les contraintes de cisaillement dans les peaux et l'âme sont données par :

Dans la peau supérieure pour $-d+e-\frac{h_1}{2}\le z\le -d+e+\frac{h_1}{2}$.

$$\tau_1(z)=\frac{T_x}{D}\frac{E_1}{2}\left[\left(d-e+\frac{h_1}{2}\right)^2-z^2\right] \quad [2.48]$$

- Dans la peau inférieure pour $e-\frac{h_2}{2}\le z\le e+\frac{h_2}{2}$.

$$\tau_2(z)=\frac{T_x}{D}\frac{E_2}{2}\left[\left(e+\frac{h_2}{2}\right)^2-z^2\right] \quad [2.49]$$

- *Contraintes de cisaillement dans le cœur*

Dans l'âme pour $-d+e-\frac{h_1}{2}\le z\le 0$.

$$\tau_c(z)=\frac{T_x}{D}\left[E_1h_1(d-e)+\frac{E_c}{2}\left\{\left(d-e-\frac{h_1}{2}\right)^2-z^2\right\}\right] \quad [2.50]$$

Dans l'âme pour $0\le z\le e-\frac{h_2}{2}$.

$$\tau_c(z)=\frac{T_x}{D}\left[E_2h_2e+\frac{E_c}{2}\left\{\left(e-\frac{h_2}{2}\right)^2-z^2\right\}\right] \quad [2.51]$$

Pour un sandwich symétrique de mêmes peaux fines avec $E_1=E_2=\boldsymbol{E_p}$, $h_1=h_2=t$ et $e=d/2$ et une âme avec un faible module d'élasticité, la contrainte de cisaillement reste constante dans l'âme et donnée par la formule suivante :

$$\tau_c=\frac{T_x}{bd} \quad [2.52]$$

La faible densité, du matériau composant le noyau associé à une contrainte de cisaillement plus ou moins constante dans la section transversale, fait que, dans toute analyse mécanique de ce type de structure, la prise en compte des déformations de cisaillement est primordiale. On peut admettre que la déformation est composée d'une contribution classique due à la flexion notée, W_f et d'une autre due au cisaillement W_s. Pour une poutre sandwich de peaux fines, l'analyse mécanique est plus simple et on peut définir la courbure totale comme étant la contribution d'une flexion et d'un cisaillement donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d^2W}{dx^2}=-\frac{M_x}{D}+\frac{1}{S}\frac{dT_x}{dx} \quad [2.53]$$

S : La rigidité en cisaillement donnée par :

$$S=\frac{Gd^2}{k} \quad [2.54]$$

G, module de cisaillement du cœur, k le facteur de cisaillement égal à 1.2 pour une section transversale rectangulaire homogène. La rigidité en cisaillement peut être calculée pour un sandwich de peaux fines $t < h_c$ et de cœur de faible module élastique $E_c < E_f$, par la relation :

$$S = \frac{G_c b d^2}{h_c} \qquad [2.55]$$

2.5 Flexion des poutres sandwichs

L'importance de développer une analyse sur le comportement en flexion des poutres est liée d'une part à l'utilisation des poutres comme éléments de base dans la réalisation des structures, et d'autre part à la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux stratifiés et des matériaux sandwichs à partir d'essais de flexion réalisés sur des éprouvettes en forme de poutres. La théorie des poutres considère que la longueur l de la poutre est très supérieure à sa largeur b (figure 2.5) [40].

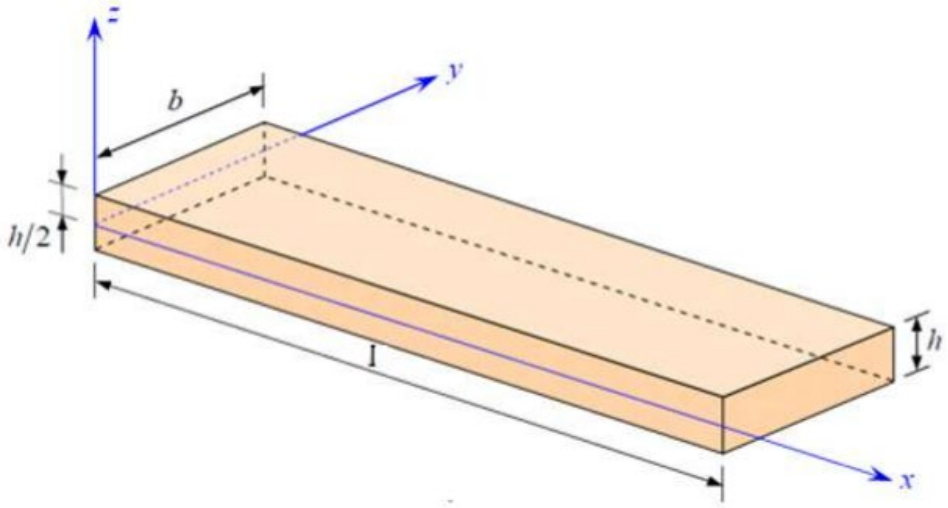


Figure 2.5 : Elément poutre [41]

2.6 Homogénéisations et théorie classique des stratifies

Cette technique permet de simplifier les calculs en étudiant le comportement de la structure uniquement ramenée à son feuillet moyen au lieu de traiter par une approche complètement tridimensionnelle [41].

Chacun des plis de la coque mince est supposé être en état plan de contrainte, d'où un comportement mécanique bidimensionnel du pli. Dans les axes d'orthotropie, la loi de Hooke du pli *k* s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{66} \end{bmatrix} \qquad [2.56]$$

Les constantes de rigidité s'expriment en fonction des modules de l'ingénieur suivant les expressions :

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \frac{E_T}{E_L}\nu_{LT}^2}, \qquad Q_{22} = \frac{E_T}{E_L} Q_{11}$$
$$Q_{12} = \nu_{LT} Q_{11}, \qquad Q_{66} = G_{LT} \qquad [2.57]$$

Dans le repère structural, la relation [2.1] devient

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & 0 \\ Q'_{12} & Q'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad [2.58]$$

En effectuant un changement de base sur les contraintes σ_{xx}, σ_{yy} et σ_{xy} on obtient :

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix}_k = T' \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k \qquad [2.59]$$

En introduisant les matrices **A, B, D,** on obtient la relation qui relie les efforts généralisés sur la coque à la déformation et à la courbure de son feuillet moyen.

$$\begin{bmatrix} N \\ M_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ \kappa \end{bmatrix} \qquad [2.60]$$

Avec :

$$A = \left[A_{ij} \right] \quad \text{avec} \quad A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} (h_k - h_{k-1}) \, (Q'_{ij})_k$$
$$B = \left[B_{ij} \right] \text{ avec } B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} (h_k^2 - h_{k-1}^2) \, (Q'_{ij})_k \qquad [2.61]$$
$$D = \left[D_{ij} \right] \text{ avec } D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} (h_k^3 - h_{k-1}^3) \, (Q'_{ij})_k$$

A : matrice de membrane qui relie les efforts dans le plan aux déformations du feuillet moyen.

D : matrice de flexion qui relie les moments aux courbures du feuillet moyen.

B : matrice de couplage, nulle lorsque l'empilement présente une symétrie miroir

Lorsque la matrice de couplage est non nulle, une charge dans le plan de la coque induit un déplacement transversal qui peut être du même ordre de grandeur, voire plus important que celui dans le plan.

Les expressions de ces contraintes peuvent être réécrites en introduisant *M* et *I* sous la forme :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{k} &= z\ a_{xx}^{k}\frac{M}{I}\\ \sigma_{yy}^{k} &= z\ a_{yy}^{k}\frac{M}{I}\\ \sigma_{xy}^{k} &= z\ a_{xy}^{k}\frac{M}{I}\end{aligned} \qquad [2.62]$$

Avec :

$$\begin{aligned}a_{xx}^{k} &= (Q_{11}^{k}D_{11}^{*} + Q_{12}^{k}D_{12}^{*} + Q_{16}^{k}D_{16}^{*})\frac{h^3}{12}\\ a_{yy}^{k} &= (Q_{12}^{k}D_{11}^{*} + Q_{22}^{k}D_{12}^{*} + Q_{26}^{k}D_{16}^{*})\frac{h^3}{12}\\ a_{xy}^{k} &= (Q_{16}^{k}D_{11}^{*} + Q_{26}^{k}D_{12}^{*} + Q_{66}^{k}D_{16}^{*})\frac{h^3}{12}\end{aligned} \qquad [2.63]$$

Les expressions précédentes des contraintes ne sont correctes qu'à une distance assez éloignée (>*h*) des bords de la poutre. Les résultats précédents ne sont donc applicables qu'au cas des poutres ayant un rapport *b/h* assez élevé.

La contrainte de cisaillement dans les couches s'écrit alors :

$$\sigma_{xz} = \frac{3Q}{2bh}\left[1 - 4\left(\frac{z}{h}\right)^2\right] \qquad [2.64]$$

La contrainte de cisaillement est maximum pour $z = 0$, soit :

$$\sigma_{xz}(z=0) = \tau_0 = \frac{3Q}{2bh} \qquad [2.65]$$

La relation (2.9) peut alors être réécrite sous la forme :

$$\sigma_{xz} = -a_{xx}^{k}\tau_0\left[4\left(\frac{z}{h}\right)^2 + d_k\right] \qquad [2.66]$$

Où les nouvelles constantes d_k sont déterminées en assurant la continuité de la contrainte σ_{xz} dans l'épaisseur de la poutre.

2.6.1 Flexion 3-points

Considérons une poutre en flexion 3-points (Figure 2.6). La symétrie du problème conduit à ne considérer qu'une moitié de poutre.

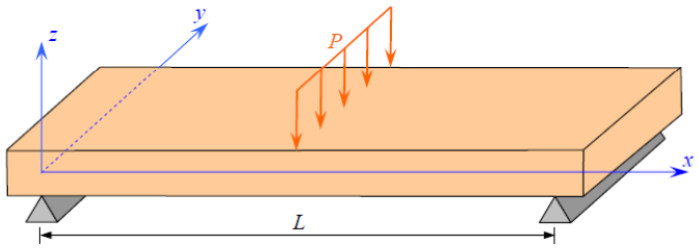


Figure 2.6 Elément poutre en flexion 3-points

Les contraintes de la couche *k* s'écrivent :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{k} &= -6\, a_{xx}^{k} \frac{P}{bh^3} xz \\ \sigma_{yy}^{k} &= -6\, a_{yy}^{k} \frac{P}{bh^3} xz \\ \sigma_{xy}^{k} &= -6\, a_{xy}^{k} \frac{P}{bh^3} xz\end{aligned} \qquad [2.67]$$

Ces contraintes sont maximales pour $x = L/2$, soit :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{k} &= -3\, a_{xx}^{k} \frac{P}{bh^3} z \\ \sigma_{yy}^{k} &= -3\, a_{yy}^{k} \frac{P}{bh^3} z \\ \sigma_{xy}^{k} &= -3\, a_{xy}^{k} \frac{P}{bh^3} z\end{aligned} \qquad [2.68]$$

Dans le cas d'une poutre en matériau homogène isotrope : $a_{xx} = 1$, et la contrainte normale s'écrit :

$$\sigma_{xx}^{k} = -\frac{3PL}{bh^3} z \qquad [2.69]$$

La contrainte de traction maximale est atteinte sur la face inférieure ($z = h/2$), et s'exprime comme suit :

$$\sigma_{xx\max}^{k} = \sigma_0 = \frac{3PL}{2bh^2} \qquad [2.70]$$

La contrainte dans la couche *k* d'un stratifié peut donc s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{xx}^{k} = -2a_{xx}^{k}\sigma_0 \frac{z}{h}$$

- *Le déplacement W au point de chargement (x=L/2)*

Le déplacement total de la poutre sandwich soumise à la flexion trois-points, sera la somme d'une contribution classique due à la flexion, w_f, et d'une autre due au cisaillement de l'âme, w_c, de sorte que $w_t = w_f + w_c$;

$$w_f = \frac{PL^3}{48D} \quad \text{et} \quad w_c = \frac{PL}{4S} \qquad [2.71]$$

D'où le déplacement total :

$$w_t = \frac{PL^3}{48D}\left(1 + \frac{12D}{SL^2}\right)$$

CHAPITRE 3

Modélisation de l'impact de l'empilement sur les contraintes et déformations des structures sandwichs en béton polymère

Les structures sandwichs avec âme en béton polymère offrent une combinaison optimale de légèreté, de rigidité et de résistance mécanique, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications soumises à des sollicitations dynamiques. La séquence d'empilement des couches composites joue un rôle fondamental dans la distribution des champs de contraintes et de déformations, influençant directement le comportement global de la structure sous charge. Afin d'optimiser leur conception, il est essentiel de comprendre l'impact de cette séquence sur la réponse mécanique du matériau. Cette étude propose une modélisation avancée de cette influence, permettant d'analyser les mécanismes internes de dissipation d'énergie, de mieux anticiper les zones critiques de déformation et de renforcer la fiabilité des structures face aux contraintes externes.

Cette étude examine l'impact de la séquence d'empilement sur la répartition des contraintes et des déformations dans quatre stratifiés croisés en fibre de verre et résine époxyde, intégrant une couche de béton polymère dont l'épaisseur varie selon la configuration. Elle se concentre sur l'analyse du comportement en statique linéaire sous flexion trois points à l'aide de la modélisation par éléments finis (M.E.F.). Les simulations réalisées avec Abaqus sont comparées aux prédictions de la théorie classique des stratifiés, avec l'utilisation des éléments coques S4R et C3DR pour les modèles 2D et 3D respectivement.

Dans le cas de la poutre étudiée, les différentes symétries géométriques permettent de ne considérer que le 1/2 de la structure (Figure 3.1). Ainsi seuls 8 plis sont modélisés dont chacun d'une épaisseur de 0.5 mm chacune, et 2 couches de béton polymère d'une épaisseur de 8 mm

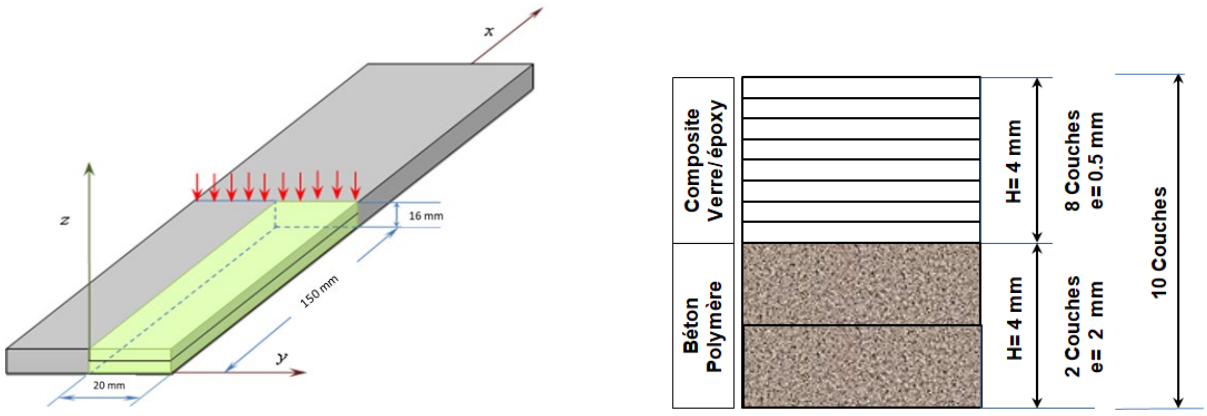


Figure 3.1 Définition de la poutre utilisée et distribution des empilements

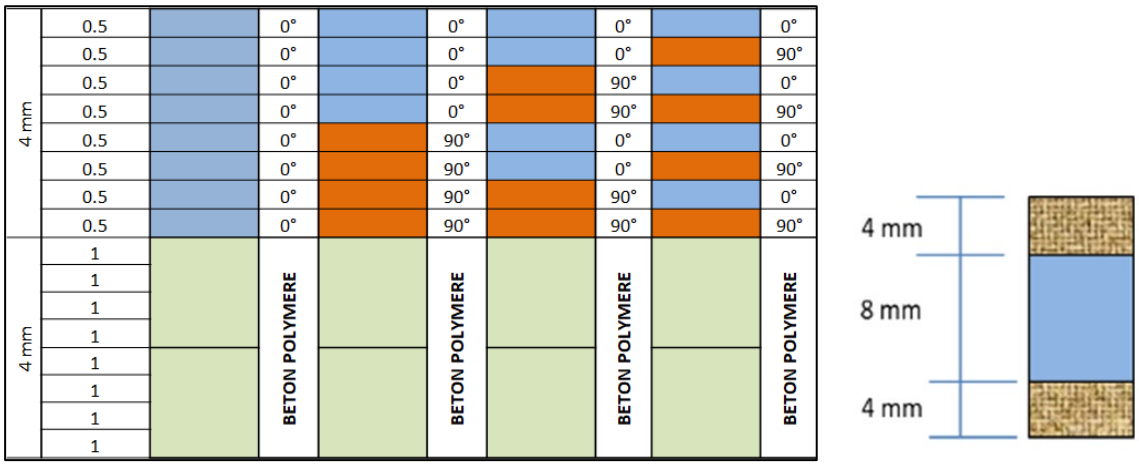


Figure 3.2 Détail des séquences d'empilements testés

3.1 Caractéristiques Mécaniques des matériaux utilisés :

Dans le cadre de cette étude, différents types de stratifiés croisés ont été élaborés pour constituer les peaux des structures sandwich. Ces stratifiés se distinguent par leur séquence d'empilement ainsi que par le rapport des épaisseurs des couches orientées à 0° et 90°. L'objectif est de maintenir une épaisseur globale constante des éprouvettes, indépendamment de la configuration choisie.

Les stratifiés sont réalisés à partir de fibres de verre et sont désignés selon quatre configurations : ST1, ST2, ST3 et ST4. Chacun de ces stratifiés comprend 16 plis, dont l'orientation varie selon la configuration afin d'analyser l'influence de l'architecture sur le comportement mécanique.

3.1.1 Caractéristiques mécaniques des fibres de verre :

Masse Surfacique…. 300 g/m^2

Masse Volumique …. 2540 kg/m^3

Module d'élasticité Longitudinal ….. 74 GPa

Coefficient de poisson ...0.25

3.1.2 Caractéristiques mécaniques de la résine époxyde :

Définition des Modules élastiques

EL : Module de Young longitudinal

ET : Module d'Young transversal

vLT : Coefficient de Poisson

GLT : Module de cisaillement

Module d'élasticité Longitudinal 2.9 GPa , v=0.4

Résistance à la traction 74 à 77 MPa

Résistance à la flexion 115 à 120 MPa

3.1.3 Caractéristiques mécaniques de Béton polymère :

Le béton polymère est considéré comme un matériau isotrope définit par :

E_L= 15000 MPa

v_{LT} = 0.3

3.1.4 Séquences d'empilements utilisées :

Cette étude porte sur les poutres sandwich composées de peaux en fibres de verre imprégnées de résine époxy et d'une âme en béton polymère. L'objectif est d'analyser l'influence de l'orientation des fibres sur différents paramètres mécaniques.

- L'orientation des fibres influence les contraintes normales et la contrainte de cisaillement.
- L'impact sur les déformations est étudié pour comprendre le comportement global de la structure.
- L'âme en béton polymère joue un rôle dans la dissipation des efforts mécaniques.
- L'objectif est d'optimiser la conception des poutres sandwich en fonction des résultats obtenus.

Nous étudions quatre configurations croisées distinctes (ST1, ST2, ST3 et ST4), chacune caractérisée par une séquence spécifique d'orientation des couches. Cette analyse vise à déterminer la configuration la plus performante en termes de résistance et de répartition des efforts, afin d'optimiser la conception des structures composites.

$$ST1 \rightarrow \quad [0_4 / 0_4 / BP_2]_S$$
$$ST2 \rightarrow \quad [0_4 / 90_4 / BP_2]_S$$
$$ST3 \rightarrow \quad [(0_2 / 90_2)_2 / BP_2]_S$$
$$ST4 \rightarrow \quad [(0/90)_4 / BP_2]_S$$

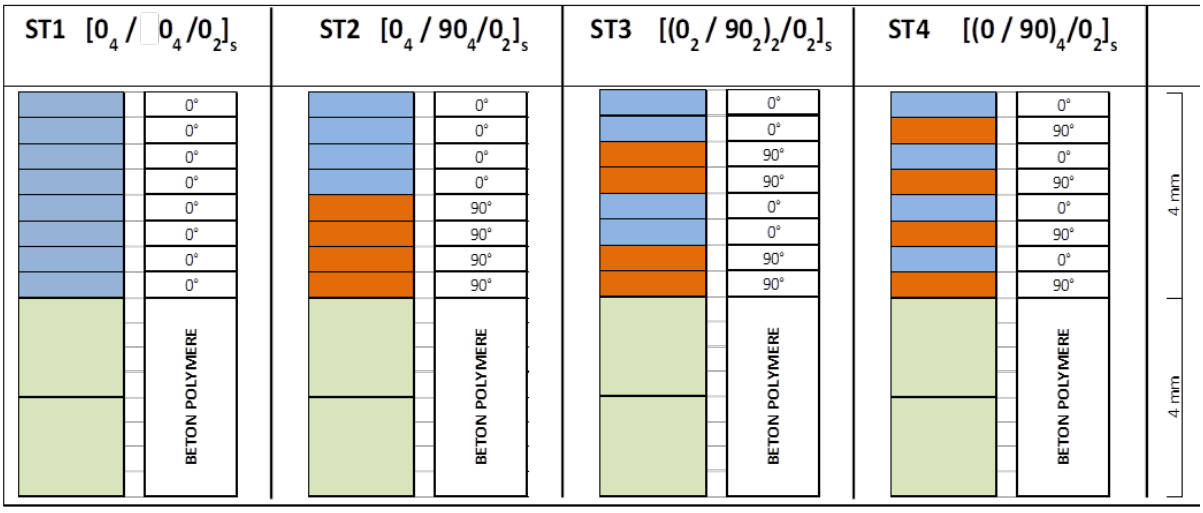


Figure 3.3 les Quatre empilements utilisés et analysés : ST1, ST2, ST3 et ST4

3.2 Méthodes de calcul et simulations :

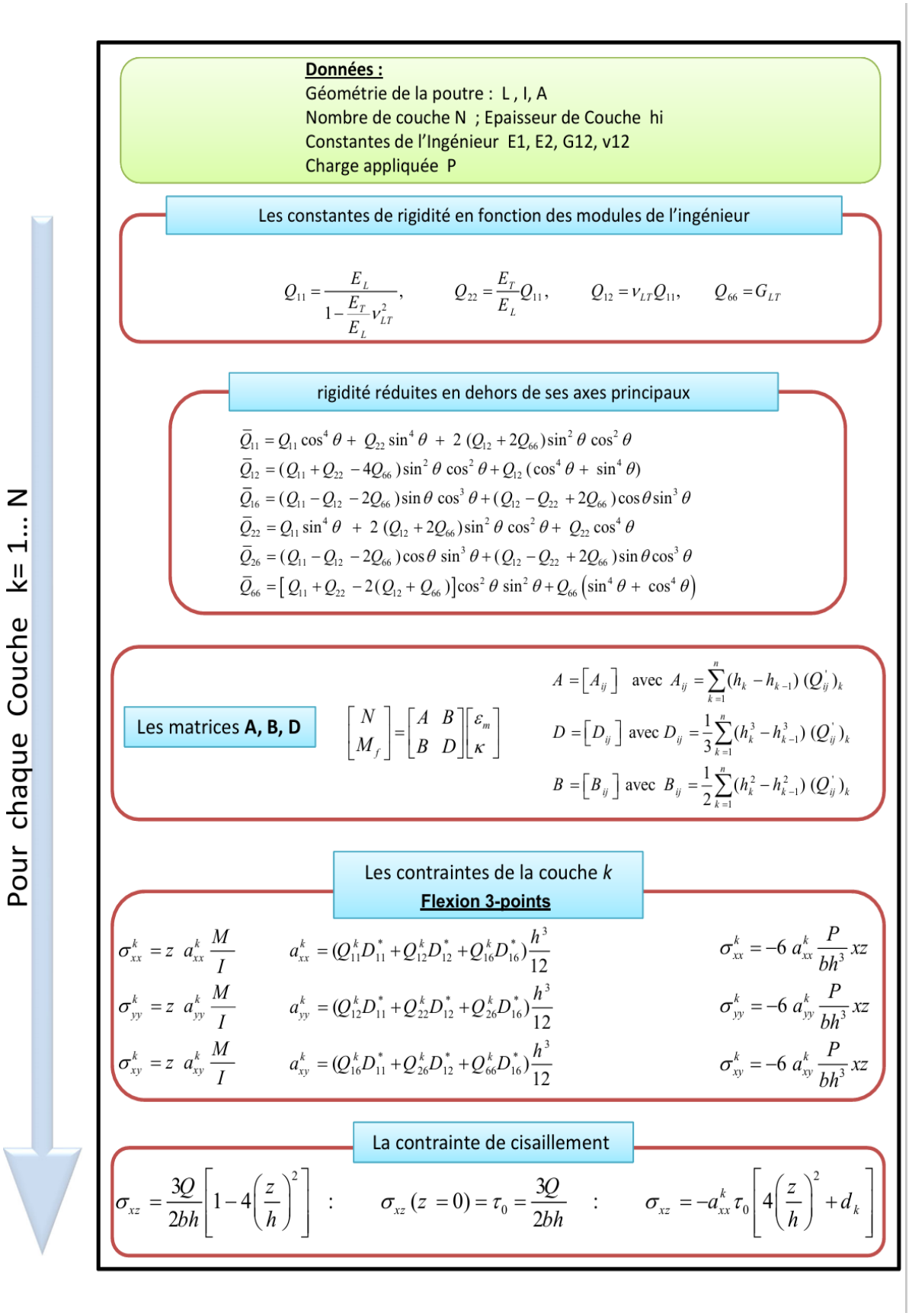
3.2.1 Homogénéisation et théorie classique des Stratifiés

Cette technique permet de simplifier les calculs en étudiant le comportement de la structure uniquement ramenée à son feuillet moyen au lieu de traiter par une approche complètement tridimensionnelle.

Chacun des plis de la coque mince est supposé être en état plan de contrainte, d'où un comportement mécanique bidimensionnel du pli. Dans les axes d'orthotrope.

Grâce à un programme Fortran développé spécifiquement et exécute les étapes de l'organigramme, nous examinons quatre configurations distinctes (ST1, ST2, ST3 et ST4), chacune caractérisée par une séquence d'orientation des couches différente. Cette analyse permet de déterminer la distribution de champs de contraintes et de déformations dans la section des quatre stratifies, et d'analyser la configuration optimale en termes de résistance et de répartition des efforts, afin d'améliorer la conception des structures composites.

Figure 3.4 Récapitulation des opérations de la méthode TCDS dans l'organigramme ci-dessous



3.3 Simulation par éléments finis

La modélisation par éléments finis est une méthode numérique puissante qui permet d'étudier des structures et matériaux complexes en les subdivisant en éléments discrets, chacun étant soumis aux équations physiques locales avant d'être assemblé pour obtenir une solution globale cohérente. Cette approche offre une grande flexibilité pour simuler des phénomènes mécaniques, thermiques ou couplés, et elle est particulièrement adaptée aux matériaux composites, où la nature des éléments varie selon la configuration. La fiabilité des résultats dépend non seulement des capacités des logiciels et des calculateurs utilisés, mais aussi de la rigueur appliquée lors de la modélisation et de l'interprétation des données. Ainsi, la méthode des éléments finis s'impose comme un outil essentiel pour la conception, l'analyse et l'optimisation des structures dans de nombreux secteurs industriels.

Dans cette étude, nous avons examiné le comportement statique linéaire de stratifiés croisés soumis à une flexion en trois points à l'aide du logiciel ABAQUS. Pour cela, nous avons comparé un modèle analytique basé sur la théorie classique des stratifiés (TCS) avec trois modèles numériques d'éléments finis :

1- Modèle 2D plan (en contrainte plan) avec l'élément CPS4R…… (1*)
2- Modèle 2D Coque modélisé par l'élément coque S4R…….. (2*)
3- Modèle 3D brique C3D8R……. (3*)
4- Tableau 3.1 Définition des éléments finis utilisés dans Abaqus

	Modèle 2D (PS)	**Modèle 2D (Shell)**	**Modèle 3D**
NNOEL	4	4	8
NDLL par nœud	2	5	3
Elément Abaqus	CPS4R	S4R	C3D8R
Intégration réduite	Oui	Oui	Oui

- 1*- CPS4R: A 4-node bilinear plane stress quadrilateral, reduced integration, hourglass control.
- 2*- S4R: A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, finite membrane strains.
- 3*- C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control.

Les modèles retenus visent à valider et comparer les résultats obtenus. Le modèle 2D simplifie le problème en deux dimensions, optimisant ainsi le temps de calcul tout en assurant une précision satisfaisante pour les structures minces. Le modèle Coque, quant à lui, intègre l'épaisseur réelle du stratifié et prend en compte les effets tridimensionnels, notamment les contraintes interlaminaires. Enfin, le modèle Block 3D, le plus détaillé, représente la structure sous forme de solide tridimensionnel complet, ce qui le rend particulièrement adapté aux géométries complexes et aux sollicitations multiaxiales. Ces différentes approches offrent un compromis entre précision et coût de calcul, et leur comparaison permet de valider la pertinence des modèles simplifiés tout en garantissant la fiabilité des résultats.

Cette modélisation contribue ainsi à une meilleure compréhension de la répartition des contraintes et à l'optimisation de la conception des structures composites.

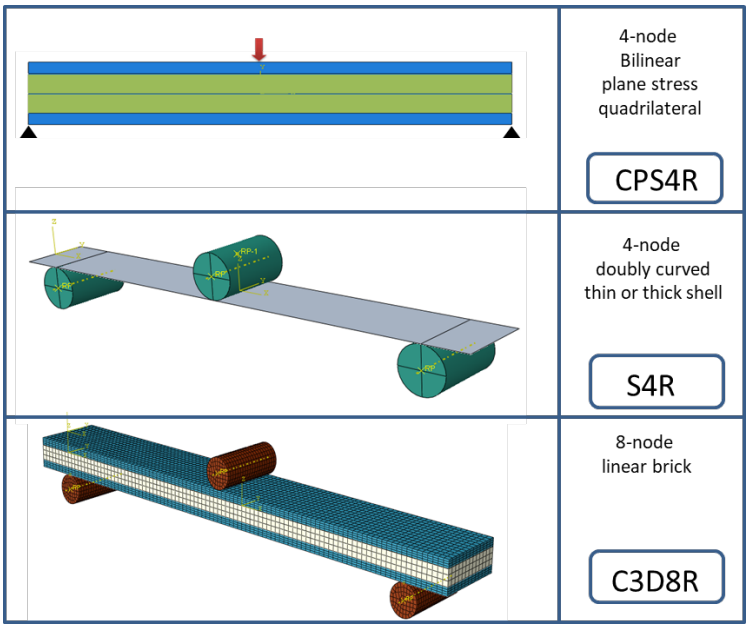


Figure 3.5 : Modèles et éléments finis utilisés dans Abaqus

3.3.1 Caractéristiques géométriques des éprouvettes :

Longueur totale L=300 mm

Longueur entre appuis l=250 mm

Largeur b=40 mm

Epaisseur h=16 mm

La charge P= -5000 N

3.3.2 Caractéristiques mécaniques des éprouvettes

Peau : E_1= 45000 MPa, E_2= = E_3= 12000 MPa, ν_{12}= 0.19, ν_{13}= ν_{23}= 0.3, G_{12}= G_{13}= 5500 MPa, G_{23}= 5000 MPa

Ame : E= 15000 MPa, ν_{LT} = 0.3

3.3.3 Interprétations des résultats :

L'impact de la séquence d'empilement des couches sur la distribution des contraintes et des déformations à travers l'épaisseur est illustré dans les figures 3 4 à 11 pour les différents stratifiés analysés. À des fins de comparaison, la variation des contraintes $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ pour une poutre homogène est également représentée sur ces mêmes figures.

3.3.4 Distributions des champs des contraintes normales σ_{xx} dans les quatre starifiés

Les configurations ST1 et ST2 se distinguent par une meilleure performance en termes de résistance globale dans la direction longitudinale, grâce à une distribution plus homogène des contraintes. En revanche, les configurations ST3 et ST4 privilégient une rigidité structurelle plus élevée, au prix d'une concentration accrue des contraintes aux interfaces.

Les figures 3 a (6,7, 8 et 9) représentent la répartition des contraintes normales σ_{xx} à travers l'épaisseur rapportées aux valeurs maximales σ_0 atteintes dans le cas d'une section homogène, selon les résultats obtenus par la théorie classique des stratifiés, comparés aux résultats obtenus par les logiciels Abaqus.

L'influence de l'empilement des couches sur la variation des contraintes et des déformations est illustrée dans les figures 3.6 a 3.11 pour les différents stratifiés étudiés. Pour comparaison, la variation des contraintes σ_{xx} dans une poutre homogène est également tracée sur ces figures.

Les résultats obtenus conduisent aux observations suivantes :

- Les contraintes normales σ_z dans la direction *z* sont nulles.
- Les contraintes et déformations sont nulles au centre du stratifié, correspondant à la fibre neutre.
- La comparaison entre les résultats issus de la méthode des éléments finis et ceux de la théorie des stratifiés montre une excellente concordance, tant pour les contraintes que pour les déformations.

3.3.5 Distribution des champs de contraintes σ_{xx} dans les quatre stratifiés

Les figures 3 6-9 (a) montrent la répartition des contraintes normales σ_{xx} dans l'épaisseur, normalisées par rapport à la valeur maximale σ_0 obtenue pour une section homogène. Ces résultats, issus de la théorie classique des stratifiés, et que sont calculés avec le programme.

On constate tout d'abord que la contrainte σ_{xx} atteint ses valeurs maximales aux extrémités la première couche pour tous les stratifiés étudiés figures 3 6-9 (a). Les courbes présentent des discontinuités par une forme en escalier, traduisant les discontinuités locales entre les différentes couches.

Le stratifié ST4 $[(0/90/BP_2)_4]_s$ qui est le moins confiné (c'est-à-dire qui présente l'empilement de plis orientés dans la même direction le plus faible), présente les contraintes les plus élevées. Les autres stratifiés sont classés selon un ordre croissant de confinement des couches, du moins au plus confiné : ST3, ST2 et ST1.

3.3.6 Distributions des champs des contraintes de cisaillement τ_{xz} dans les quatre stratifies

Dans tous les stratifiés étudiés, les contraintes maximales de cisaillement τ_{xz} se situent au niveau de la fibre neutre. L'amplitude de ces contraintes diminue avec l'augmentation du confinement du stratifié. La répartition des contraintes dépend fortement de l'empilement des couches et s'écarte significativement des prédictions de la théorie classique des poutres homogènes. Les figures (3.4-9) montrent que la contrainte de cisaillement est principalement concentrée dans le noyau du béton polymère. Le stratifié ST4, grâce à une alternance stricte des couches, présente une distribution plus

uniforme des contraintes, tandis que la présence de plis orientés à 0° contribue à atténuer les pics de contrainte.

3.3.7 Distributions de champ de contrainte σ_{yy} dans les plis des quatre starifiés.

Une forme pyramidale est observée pour les contraintes σ_{yy} (Figure 3.10). Les valeurs maximales sont obtenues, pour tous les stratifiés, à l'interface des couches externes orientées à 0°. Cette contrainte est toujours positive au niveau des plis orientés à 0° et négative dans le cas des plis orientés à 90°. Comparativement aux contraintes σ_{xx}, on remarque que les valeurs des contraintes σ_{yy} sont beaucoup plus faibles. Les figures 3.10 représente La variation de contrainte σ_{yy} à travers les plis des deux stratifiés ST1 et ST4, selon les formulations et logiciels utilisés.

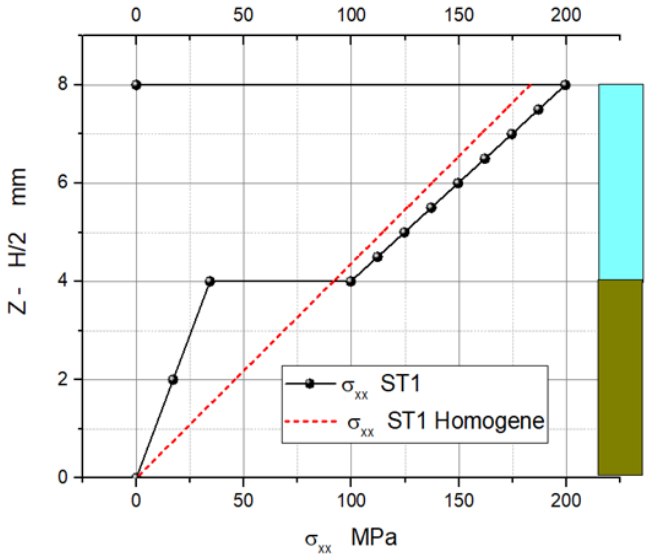


Figure 3.6 (a)

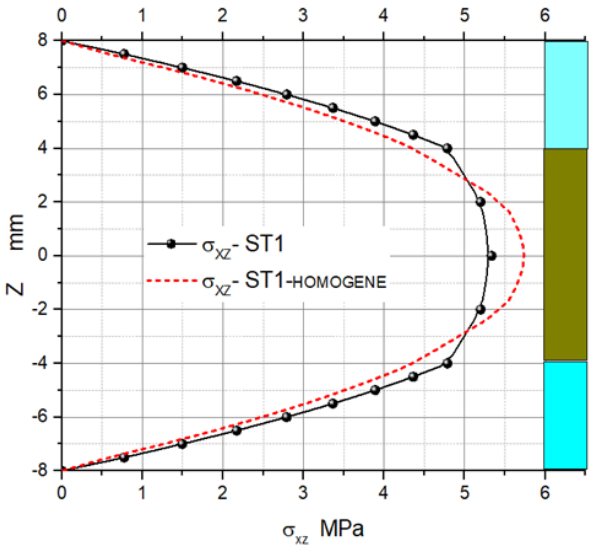


Figure 3.6 (b)

Figure 3.6 (a,b) Répartition des contraintes normales σ_{xx} et de cisaillement σ_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST1

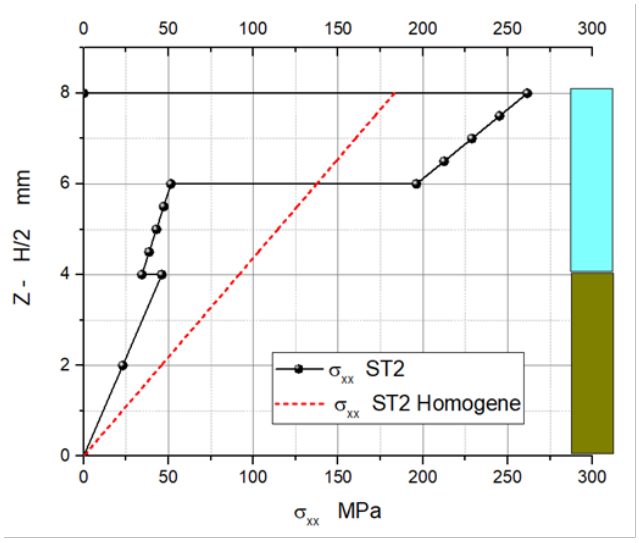


Figure 3.7 (a)

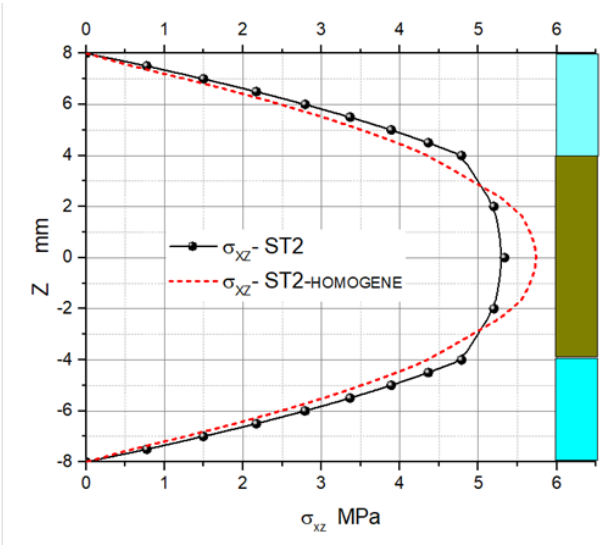


Figure 3.7 (b)

Figure 3.7 (a,b) Répartition des contraintes normales σ_{xx} et de cisaillement σ_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST2

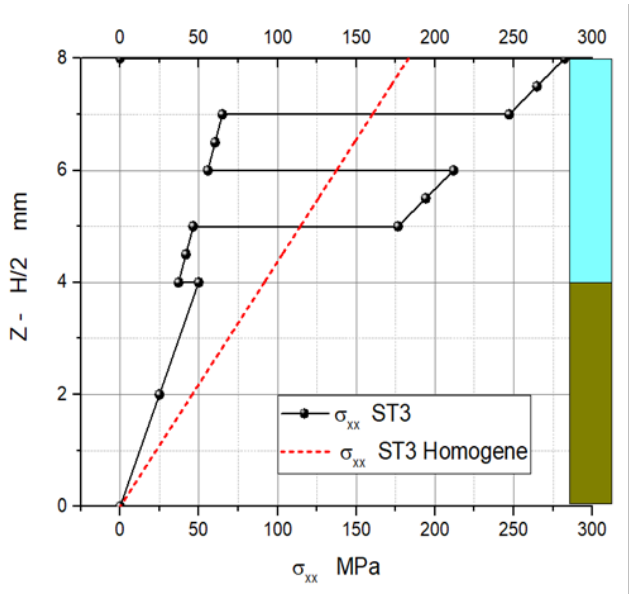


Figure 3.8 (a)

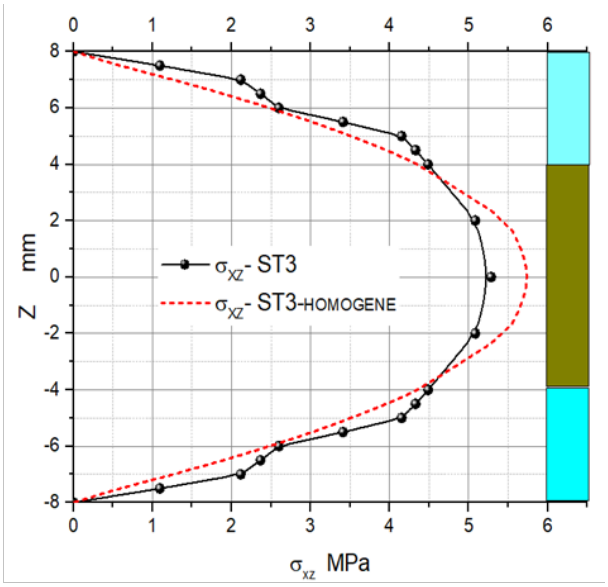


Figure 3.8 (b)

Figure 3.8 (a,b) Répartition des contraintes normales σ_{xx} et de cisaillement σ_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST3

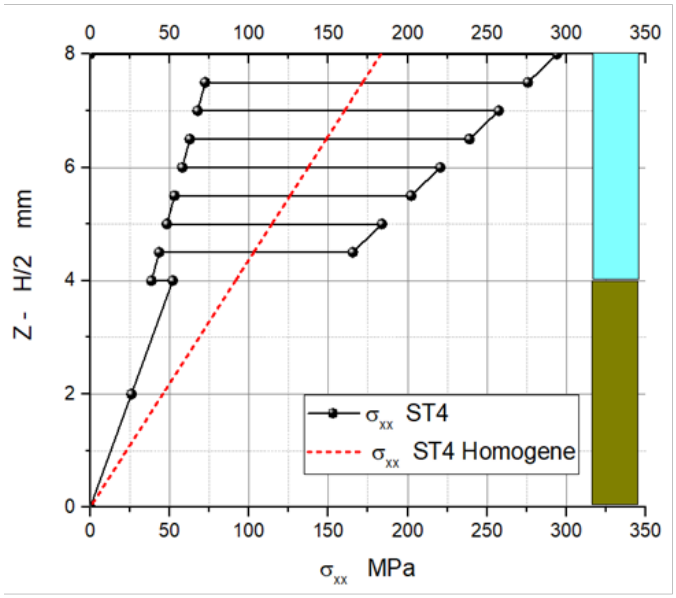


Figure 3..9 (a)

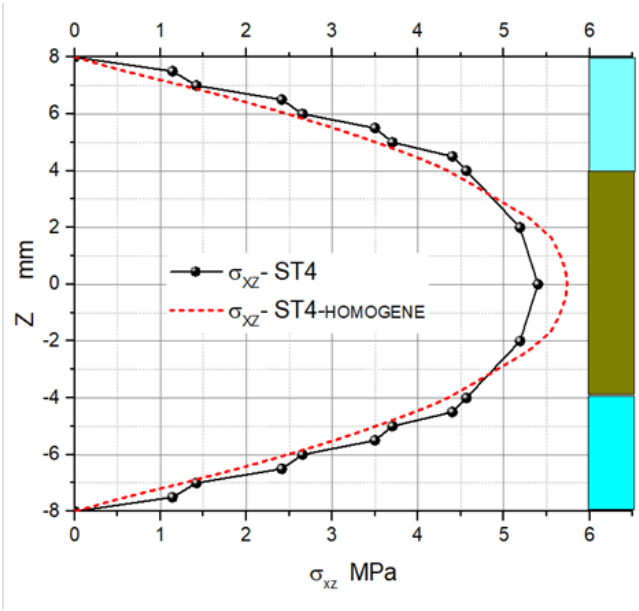


Figure 3..9 (b)

Figure 3.9 (a,b) Répartition des contraintes normales σ_{xx} et de cisaillement σ_{xz} dans l'épaisseur du stratifié ST4

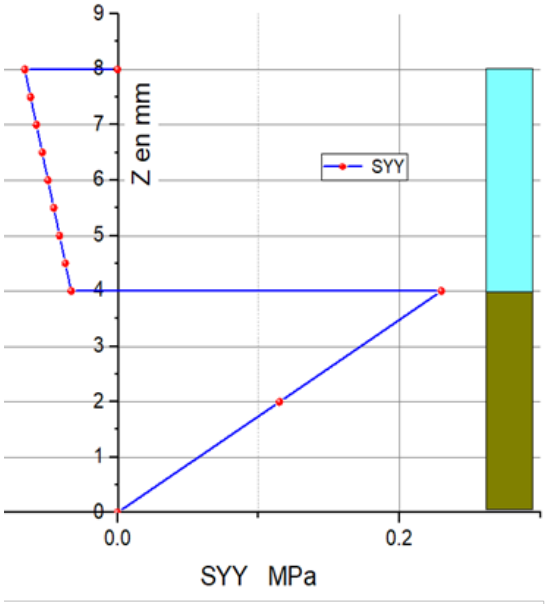


Figure 3.10 (a)

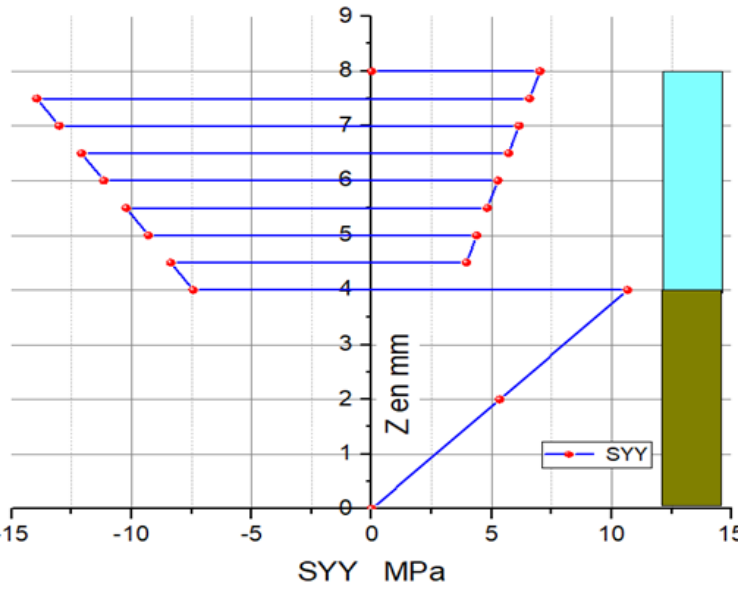


Figure 3.10 (b)

Figure 3.10 (a,b) Répartition des contraintes normales σ_{yy} dans l'épaisseur des stratifiés ST1, ST4

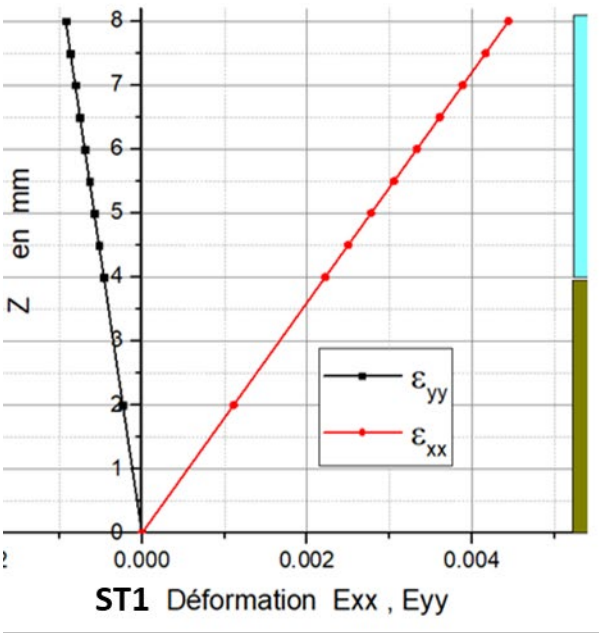


Figure 3.11 (a)

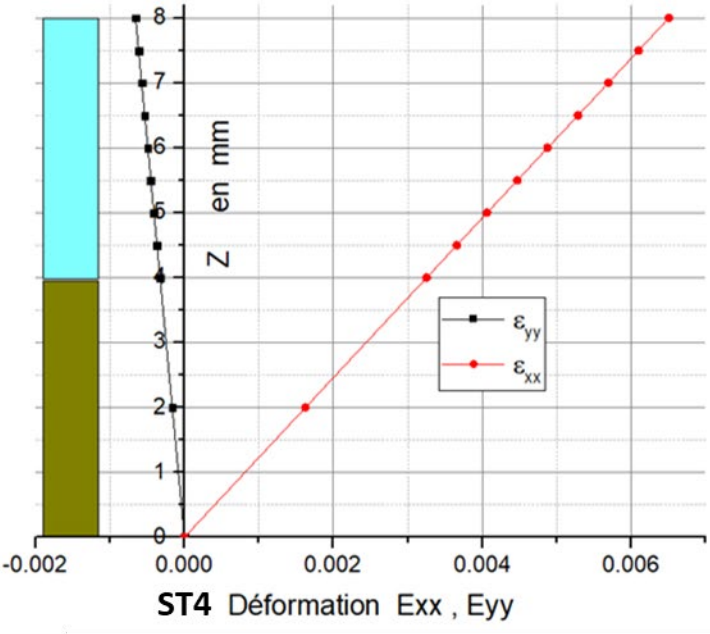


Figure 3.11 (b)

Figure 3.11 (a,b) Répartition des déformations ε_x , ε_y dans l'épaisseur des stratifiés ST1, ST4

3.3.8 Distributions des déformations dans les plis des quatre starifiés

La Figure 3.11 (a,b) présente la variation des déformations longitudinales (ε_{xx}) et transversales (ε_{yy}) en fonction de l'épaisseur z du stratifié. On observe une distribution linéaire et symétrique des deux déformations par rapport à la fibre neutre (z = 0), où les deux courbes se croisent. Cette distribution traduit le comportement classique en flexion des stratifiés, avec des valeurs maximales de déformation de part et d'autre de la fibre neutre. Les déformations ε_{xx} et ε_{yy} évoluent de façon opposée : l'une est positive alors que l'autre est négative, ce qui reflète **l'état de flexion et la loi de Poisson dans le matériau composite**. Ce comportement linéaire et symétrique est observé pour tous les stratifiés étudiés, quels que soient l'empilement ou la nature des couches, traduisant la cohérence des résultats obtenus par les différentes méthodes de calcul.

3.3.9 Comparaison des résultats des différents stratifies

Une plaque homogène de même épaisseur et de rigidité moyenne équivalente a été simulée pour référence.

Tableau 3.2 Résultats des quatre stratifies comparés à la poutre homogène

Modèle	σ_{xx} max (MPa)	τ_{xz} max (MPa)	ε_{xx} max	Flèche (mm)
ST1	199.47	5.33	0.0044	2.88
ST2	261.57	5.12	0.00579	3.77
ST3	282.30	5.28	0.00625	4.06
ST4	294.10	5.4	0.00650	4.23

Le tableau compare les performances mécaniques de quatre stratifiés à celles d'une plaque homogène de même épaisseur et de rigidité moyenne équivalente. On observe que tous les stratifiés présentent des contraintes maximales (σ_{xx} et τ_{xz}), des déformations (ε_{xx}) et des flèches nettement supérieures à celle de la plaque homogène. Par exemple, le stratifié ST1 affiche la plus faible contrainte longitudinale maximale (199.47 MPa) et la plus petite flèche (2,81 mm), contre 183.11 MPa et 4,0 mm pour la plaque homogène. Cela montre que les stratifiés, et en particulier ST1, offrent une meilleure rigidité et une résistance accrue en flexion, alors que la plaque homogène subit des sollicitations moins élevées et se déforme davantage à charge équivalente. Ainsi, l'optimisation de l'empilement des couches dans les stratifiés permet d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques que le matériau homogène de référence.

Cette étude met en évidence l'impact fondamental de la séquence d'empilement des plis sur le comportement mécanique des stratifiés composites. Les contraintes longitudinales **σxx**, nettement plus élevées que les contraintes transversales **σyy**, atteignent leur maximum aux extrémités des plis orientés à **0°**, tandis que les contraintes de cisaillement **τxz** se concentrent au niveau de la fibre neutre, leur amplitude diminuant à mesure que le confinement des plis augmente.
La distribution pyramidale des contraintes transversales ainsi que la variation linéaire et symétrique des déformations confirment un comportement en flexion conforme aux modèles classiques. La comparaison avec une plaque homogène de même épaisseur démontre que les stratifiés, grâce à une optimisation rigoureuse de l'empilement, offrent une rigidité et une résistance supérieures.
Parmi les modèles étudiés, ceux reposant sur la méthode des éléments finis multicouches, prenant précisément en compte l'agencement et les propriétés anisotropes, se révèlent les plus performants pour prédire le comportement mécanique des stratifiés. L'optimisation de l'empilement repose sur la

maîtrise du nombre, de l'ordre et de l'orientation des plis, afin de maximiser la rigidité, la résistance et la durabilité tout en minimisant le poids et en tenant compte des contraintes de fabrication.
Enfin, parmi les quatre stratifiés analysés, le modèle **ST1** se distingue par sa rigidité supérieure, caractérisée par une flèche minimale et des contraintes maximales réduites, confirmant l'intérêt d'un empilement confiné et optimisé. Dans le cas des matériaux sandwich, l'association de peaux stratifiées optimisées et d'une âme légère mais rigide constitue la solution la plus efficace, garantissant un excellent équilibre entre légèreté, rigidité et résistance aux dommages.
Ces résultats soulignent la nécessité d'une modélisation précise et d'une conception rigoureuse pour optimiser les performances des structures composites.

À partir des résultats obtenus, les conclusions peuvent être résumées par les points suivants :

- La distribution des contraintes varie en fonction du type d'empilement et diffère de celle des poutres homogènes.
- Les contraintes $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ et les déformations $\boldsymbol{\varepsilon_{xx}}$ sont les plus élevées, avec des valeurs environ **20 fois supérieures à** $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$, tandis que $\boldsymbol{\varepsilon_{xx}}$ est **10 fois plus importante** que $\boldsymbol{\varepsilon_{yy}}$. Les contraintes maximales (σ_{xx} et σ_{yy}) ainsi que les déformations maximales (ε_{xx} et ε_{yy}) se situent aux extrémités des stratifiés. En revanche, les contraintes de cisaillement maximales (σ_{xz}) sont concentrées au centre de la poutre.
- Les résultats obtenus via le modèle par éléments finis (EF) concordent bien avec ceux issus de la théorie des stratifiés.
- L'augmentation du confinement du stratifié entraîne une hausse des contraintes $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ ainsi que des déformations $\boldsymbol{\varepsilon_{xx}}$ et $\boldsymbol{\varepsilon_{yy}}$.

3.3.10 Résultats des différents Modèle éléments finis

L'analyse des structures composites repose sur des modèles numériques permettant de prédire leur comportement mécanique avec précision. Parmi ces approches, la méthode des éléments finis (EF) joue un rôle central, offrant une modélisation détaillée des phénomènes physiques impliqués. Cependant, différents modèles EF existent, chacun présentant des hypothèses et des niveaux de précision variés.

Cette étude vise à comparer les résultats obtenus à partir de plusieurs modèles d'éléments finis, en évaluant leurs performances en termes de précision, de fiabilité et de représentativité du comportement réel des stratifiés composites. L'objectif est d'identifier le modèle le plus adapté aux exigences spécifiques de la simulation, en tenant compte des contraintes computationnelles et des propriétés anisotropes des matériaux analysés.

Le comportement statique linéaire de stratifiés croisés soumis à une flexion en trois points est analyse en utilisant le logiciel **ABAQUS**. Pour cela, une comparaison a été réalisée entre un modèle analytique basé sur la **théorie classique des stratifiés (TCS)** et trois modèles numériques utilisant trois types d'éléments finis les plus connus dans le domaine de la bibliothèque d Abaqus

Tableau 3.3 : Résultats des différents modèles et éléments utilises compares au TCDS

Critère	TCDS	COQUE 2D CPS4R	COQUE 3D S4R	BLOCK 3D C3D8R
Déplacement U3 (mm)	2.81	3,014	4,16	4,24
La contrainte normale (MPa)	199.47	205.54	266.82	278.70
La contraint tangentielle (MPa)	5,33	8	6	7,5

- Déplacement au milieu de la poutre U3: Le modèle TCDS montre un déplacement positif de 2,81 mm, indiquant qu'il est le plus rigide parmi les modèles étudiés. Les déplacements obtenus avec les modèles Coque 3D (4,16 mm) et Block 3D (4,24 mm) sont relativement proches. Le modèle Coque 2D, avec un déplacement légèrement plus faible de 3,014 mm, reflète la simplification due à son approche bidimensionnelle.
- Contrainte normale: Les modèles Coque 3D et Block 3D affichent la contrainte normale la plus élevée, à 278,7 MPa. Le modèle Coque 2D donne une valeur intermédiaire d'environ 205 MPa, tandis que le modèle TCDS sous-estime cette contrainte avec environ 200 MPa.
- Contrainte tangentielle (cisaillement): Le modèle Coque 2D présente la contrainte tangentielle la plus importante, à 8 MPa, suivi de près par le modèle Coque 3D avec 7,5 MPa, puis le modèle Block 3D avec 6 MPa. Le modèle TCDS affiche la plus faible contrainte tangentielle, à 5,33 MPa.

3.4 Analyse et comparaison :

- Les résultats montrent que les modèles tridimensionnels (Coque 3D et Block 3D) sont entièrement en accord. Le modèle analytique TCS sous-estime la contrainte normale et le déplacement. La simplification en 2D entraîne une sous-estimation des contraintes normales.

Les contraintes tangentielles sont presque les mêmes. Ces différences soulignent l'importance de choisir un modèle adapté à la complexité du problème étudié.

- En conclusion, la comparaison des résultats met en évidence la complémentarité des méthodes analytiques et numériques. Le modèle TCS sous-estime les déplacements et contraintes standards, tandis que les modèles numériques 3D permettent une analyse plus approfondie et précise, notamment pour les contraintes normales. Le choix du modèle doit donc être guidé par les objectifs de l'étude et les ressources disponibles.

3.5 Conclusion :

Les trois modèles numériques par éléments finis présentent des tendances similaires en matière de répartition des contraintes, mais le modèle Block 3D permet une analyse plus détaillée des effets locaux et des pics de contrainte, essentiels pour l'évaluation de la tenue à la rupture et du risque de délaminage. Les modèles simplifiés, tels que Shell 2D et TSC, constituent un bon compromis entre précision et rapidité de calcul pour les analyses globales, tandis que le modèle Block 3D demeure plus adapté aux études détaillées et aux zones critiques. L'accord général entre ces modèles confirme la robustesse des approches simplifiées, tout en mettant en évidence l'importance d'une modélisation tridimensionnelle pour une meilleure compréhension du comportement mécanique des stratifiés composites.

3.6 Influence du rapport de rigidité entre la peau et le cœur sur la contrainte de cisaillement dans une structure sandwich.

Cette étude vise à analyser l'influence du rapport de rigidité entre les peaux et le cœur d'une structure sandwich sur la répartition des contraintes de cisaillement à travers son épaisseur, en s'appuyant sur des modélisations numériques et des analyses mécaniques détaillées.

Ec : le module élastique du cœur / Ep : le module élastique du cœur

Le rapport de rigidité Ep/Ec est attribué les valeurs 10, 100, 10 000 et 1 000 000. Pour chaque cas, la contrainte de cisaillement est calculée ainsi que sa distribution à travers l'épaisseur du sandwich. Les résultats obtenus seront ensuite comparés à ceux d'une poutre homogène afin d'évaluer les effets induits par la variation de rigidité entre la peau et le cœur de la structure.

3.6.1 Interprétation et discussion des résultats :

Le graphique illustre l'effet du rapport de rigidité entre les peaux (Ep) et le cœur (Ec) dans une structure sandwich

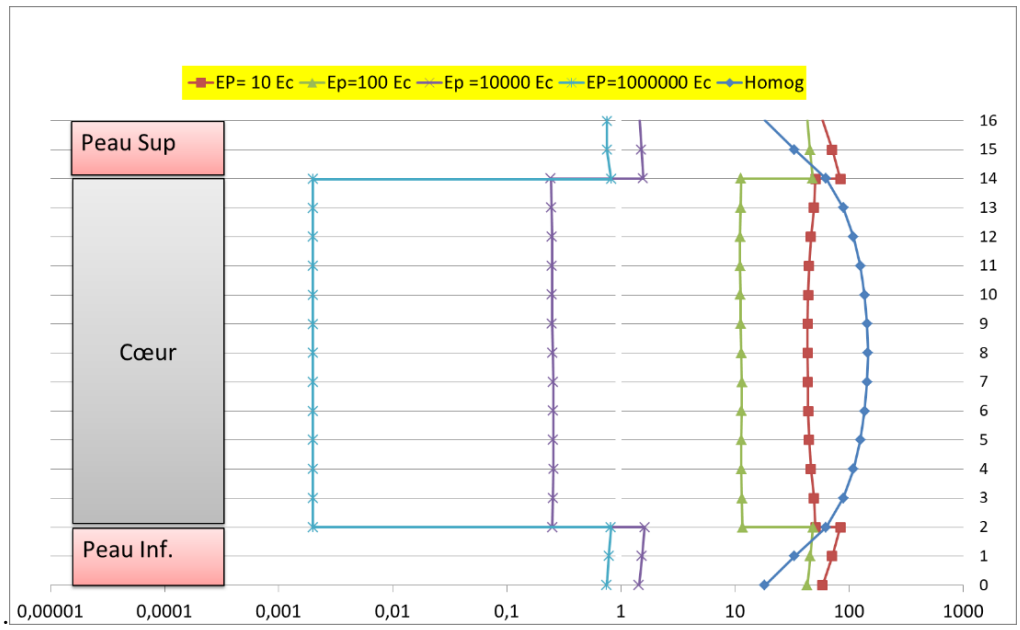


Figure 3.12- Influence du rapport de rigidité peaux/cœur sur la répartition des contraintes dans une structure sandwich

3.6.2 Résultats et interprétation

La figure 3.12 montre la répartition des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur pour différents rapports Ep/Ec. Lorsque ce rapport est faible (Ep ≈ 10 Ec), la distribution des contraintes est relativement homogène, indiquant que le cœur participe significativement à la résistance globale, à l'image d'un matériau homogène. À mesure que le rapport Ep/Ec augmente (jusqu'à 1 000 000), les contraintes se concentrent de plus en plus dans les peaux supérieure et inférieure, tandis que le cœur supporte très peu de contraintes normales.

3.6.3 Rôle respectif des peaux et du cœur selon le rapport de rigidité

Ces résultats confirment la dissociation des fonctions dans une structure sandwich optimisée :

- **Pour un rapport élevé Ep/Ec**, les peaux, très rigides, reprennent l'essentiel des efforts normaux (traction/compression), tandis que le cœur, plus souple, assure principalement la transmission des efforts de cisaillement et maintient l'écartement entre les peaux.
- **Pour un rapport faible**, le cœur participe aussi à la résistance en flexion, mais la structure perd alors l'avantage mécanique spécifique du sandwich.

3.6.4 Conséquences d'un cœur trop souple

Un cœur trop souple (Ec très faible) ne transmet plus efficacement les efforts de cisaillement. Les peaux se retrouvent alors sollicitées non seulement en traction/compression, mais aussi en cisaillement, ce qui n'est pas leur fonction optimale. Cette mauvaise répartition des efforts peut entraîner :

- Une perte significative de rigidité globale,
- Une augmentation des déformations,

- Des risques accrus de défaillances locales (poinçonnement, décollement entre cœur et peaux, flambage local).

3.6.5 Intérêt de l'optimisation du rapport de rigidité

L'optimisation du rapport Ep/Ec est donc essentielle pour exploiter pleinement les avantages des structures sandwich :

- **Légèreté** : grâce à un cœur peu dense,]
- **Rigidité élevée** : assurée par des peaux très rigides,
- **Efficacité mécanique** : chaque composant joue son rôle optimal (peaux pour les efforts

3.6.6 Conclusion :

L'analyse des résultats met en évidence l'impact majeur du rapport de rigidité entre les peaux et l'âme sur la distribution des forces dans une structure sandwich. Avec un rapport de rigidité élevé, les peaux très rigides supportent principalement les efforts normaux de traction et de compression, tandis que l'âme plus souple transmet les efforts de cisaillement et maintient l'espacement entre les peaux. En revanche, lorsque l'âme est trop souple, elle ne peut plus transmettre efficacement ces forces, ce qui entraîne des contraintes de cisaillement anormales sur les peaux, d'où une perte de rigidité globale, une augmentation des déformations et un risque accru de rupture locale. L'optimisation du rapport de rigidité Ep/Ec est donc essentielle pour concevoir des structures sandwichs à la fois légères et rigides, où chaque composant joue un rôle spécifique, garantissant performance mécanique et durabilité, notamment dans des secteurs exigeants comme l'aéronautique ou le génie civil.

3.7 Effet du pourcentage de résine dans le béton polymère de l'âme

Le phénomène de rigidité relative entre les peaux et le cœur, précédemment analysé, peut servir à examiner l'impact de la rigidité du béton polymère en fonction du taux de résine utilisé dans l'âme d'une structure sandwich.

L'étude explore l'influence de la teneur en résine dans l'âme en béton polymère des poutres sandwich, un matériau composite dont les propriétés mécaniques varient selon le pourcentage de résine utilisé. Cette variation impacte directement le comportement en cisaillement, essentiel pour assurer le transfert des efforts entre les peaux et la stabilité de la structure. Afin de mieux comprendre ces effets, plusieurs formulations ont été analysées avec des taux de résine de 5 %, 20 %, 50 % et 90 %.

- La rigidité du béton polymère dépend du dosage en résine.
- Le cisaillement joue un rôle clé dans le transfert des efforts et la stabilité.
- Des simulations ont été réalisées avec différentes teneurs en résine pour évaluer leur impact sur la performance mécanique.

Tableau 3.4 Modules élastiques du béton polymère en fonction de la teneur en résine.

Teneur en Résine	E - MPa	*v*
5 %	9 828,41	0,22
10 %	8 245,27	0,25
20 %	6 023,49	0,28
30 %	3 804,14	0,31
40 %	3281,10	0,32
60 %	2 957,76	0,33
80 %	2 634,98	0,38
90 %	2 558,88	0,42

3.7.1 Résultats et analyses

Le graphique analysé montre la variation de la contrainte de cisaillement σ_{XZ} le long de la hauteur du noyau pour différentes teneurs en résine (5%, 20%, 50% et 90%). On constate que, quelle que soit la formulation, la distribution des contraintes est symétrique et atteint son maximum au centre du noyau, puis diminue vers les extrémités. Plus précisément, la contrainte de cisaillement maximale diminue fortement lorsque la proportion de résine augmente, passant d'environ 9 MPa à 5% de résine à seulement 6 MPa à 90%. Cette évolution traduit une perte progressive de rigidité et de capacité à transférer les forces de cisaillement, liée à la réduction de la proportion de charges minérales dans la matrice. Ainsi, une âme à faible teneur en résine (5-20%) continue à mieux résister au cisaillement, alors qu'une forte teneur en résine (50-90%) compromet considérablement la résistance mécanique, ce qui peut affecter la stabilité de la structure sandwich. Par conséquent, un dosage optimisé de la résine est essentiel pour garantir de bonnes performances mécaniques du béton polymère.

3.7.2 Remarques et points sur le Graphe

- Influence de la teneur en résine : L'augmentation du taux de résine réduit la contrainte maximale, passant de 9 MPa (5 % de résine) à 6 MPa (90 %).
- Perte de rigidité : La diminution des charges minérales entraîne une baisse de la capacité à transférer les efforts de cisaillement.
- Impact sur la résistance mécanique : Une faible teneur en résine (5-20 %) améliore la résistance au cisaillement, tandis qu'une teneur élevée (50-90 %) l'affaiblit, compromettant la stabilité de la structure.

- Importance du dosage optimisé : Un équilibre dans la formulation est nécessaire pour garantir les performances mécaniques du béton polymère.

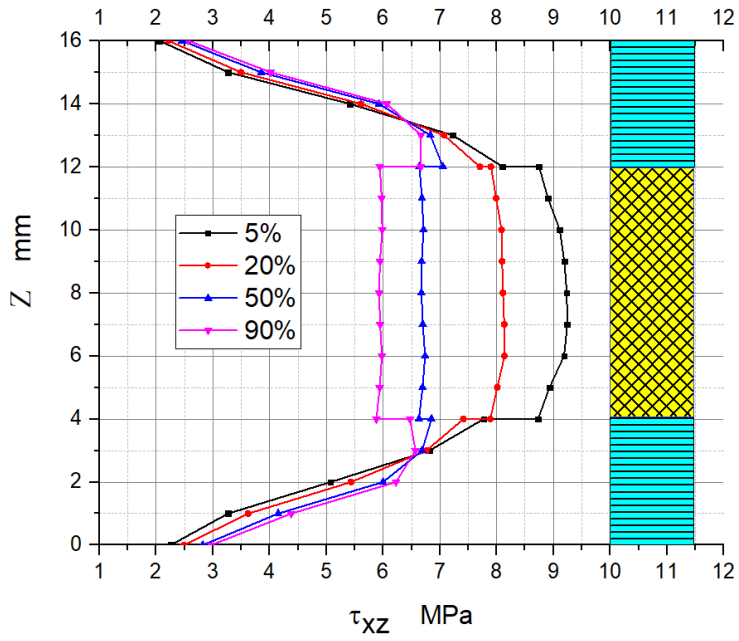


Figure 3.13 : Influence du pourcentage de résine sur la distribution des contraintes de cisaillement dans l'âme en béton polymère

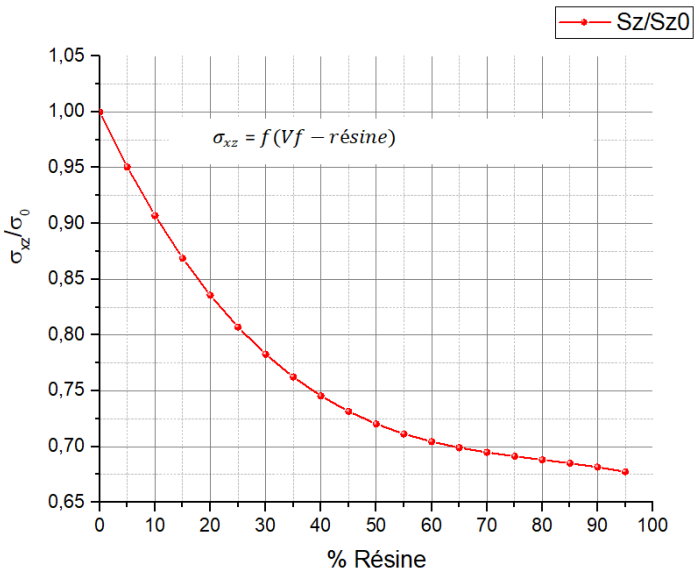


Figure 3.14 Influence du pourcentage de résine sur la contrainte de cisaillement normalisée dans l'âme en béton polymère

3.7.3 Interprétation des résultats :

L'évolution de la contrainte de cisaillement normalisée (σxz/σ0) en fonction de la teneur en résine dans l'âme du béton polymère montre une diminution progressive. À faible taux de résine (0-10 %), le matériau conserve une bonne capacité de transfert des efforts. Cependant, entre 10 % et 50 %, la

contrainte chute significativement, traduisant une réduction de la résistance au cisaillement. Au-delà de 50 %, la baisse ralentit et se stabilise autour de 0,68 à 90 %. Cette évolution s'explique par l'amélioration de la cohésion de la matrice avec l'ajout de résine, mais aussi par la perte de performance mécanique lorsque la résine pure devient dominante. Un dosage modéré est donc essentiel pour garantir un équilibre optimal entre rigidité et capacité de transfert des efforts.

3.8 CONCLUSION :

L'efficacité mécanique des structures sandwich repose en grande partie sur les propriétés de leur âme, notamment lorsqu'elle est constituée de béton polymère. Cette étude met en lumière l'influence déterminante du dosage en résine sur les performances du matériau. Un excès de résine diminue la proportion de charges minérales, essentielles à la rigidité et à la résistance mécanique, compromettant ainsi la capacité de l'âme à transmettre les efforts de cisaillement entre les peaux. Un dosage modéré en résine permet d'atteindre un équilibre optimal entre cohésion, rigidité et résistance, assurant à la fois la stabilité, la durabilité et la performance globale des poutres sandwich. L'optimisation de cette formulation s'avère donc essentielle pour garantir la fiabilité des structures en génie civil.

CHAPITRE

Analyse numérique du comportement à l'impact à faible vitesse des sandwichs à cœur en béton polymère

4.1 Impacts à basse vitesse : Phénomène, mécanismes et influence sur les matériaux composites

L'impact à basse vitesse est un phénomène complexe qui peut entraîner des dommages significatifs aux structures. Une compréhension approfondie des mécanismes impliqués, des facteurs influençant la réponse et des méthodes d'évaluation des dommages est essentielle pour la conception de structures sûres et résilientes. Les avancées dans la modélisation numérique, notamment la méthode des éléments finis, jouent un rôle crucial dans l'analyse et la prédiction du comportement des structures soumises à des impacts à basse vitesse, permettant ainsi d'optimiser leur conception et d'assurer leur intégrité.

Tout au long de leur cycle de vie, les structures sont exposées à des impacts de corps étrangers, que ce soit lors de la fabrication, de la maintenance ou de l'utilisation. La nature et l'intensité de ces impacts varient, mais ils peuvent compromettre l'intégrité des matériaux et affecter leur performance à long terme.

Dans le secteur aéronautique, par exemple, les opérations de décollage et d'atterrissage génèrent des projections de débris à grande vitesse susceptibles d'endommager les structures. En revanche, lors des phases de fabrication et de maintenance, les impacts, bien que généralement moins rapides, impliquent des masses plus importantes, telles que des outils ou des équipements. Les matériaux composites stratifiés sont particulièrement vulnérables à ces agressions, car elles engendrent des dommages internes souvent imperceptibles à l'œil nu, tels que des délaminages ou des fissures. Ces altérations peuvent réduire significativement la résistance mécanique des structures et évoluer sous contrainte, représentant ainsi un risque pour la sécurité et la durabilité des équipements.

Face à ces défis, il est essentiel d'analyser l'impact des chocs sur les matériaux composites et d'intégrer des stratégies de prévention dès la phase de conception. Cette exigence justifie en partie les restrictions d'usage des composites, malgré leurs nombreux atouts en termes de légèreté et de performance mécanique. Une approche rigoureuse, combinant études expérimentales et modélisation, permet d'optimiser la conception des structures et d'assurer leur fiabilité face aux sollicitations externes. En mécanique, un impact se définit comme la collision brusque entre deux corps, caractérisée par l'application d'une force intense sur une durée extrêmement courte. Ce phénomène entraîne une variation rapide de la vitesse et peut provoquer des déformations locales, des dommages

structurels, voire des ruptures, en fonction de l'énergie impliquée et des propriétés des matériaux concernés.

Dans le cas des matériaux composites, l'impact génère des mécanismes d'endommagement complexes, tels que la fissuration de la matrice, la rupture des fibres et, surtout, la délamination entre les couches. Ces altérations, souvent imperceptibles en surface, peuvent compromettre la fiabilité et la durabilité des structures, d'autant plus qu'elles peuvent évoluer sous l'effet de sollicitations répétées. De plus, la masse, la vitesse et la géométrie du projectile influencent de manière significative la nature et l'étendue des dommages. Ainsi, l'énergie cinétique transférée lors de l'impact constitue un paramètre fondamental dans l'analyse de la résistance aux chocs mécaniques.

4.1.1 Classification des impacts

Les impacts sont principalement classés en fonction de leur vitesse, selon la typologie suivante :

4.1.2 Impact à basse vitesse (0 à 50 m/s)

Ce type d'impact est généralement associé à la chute d'outils lors de la maintenance ou à la percussion de petits débris projetés à faible vitesse sur une piste. Il peut s'agir de :

- Chocs mous : débris légers, éclatement de pneus.
- Chocs durs : outils métalliques ou objets de masse significative.

4.1.3 Impact à vitesse modérée (50 à 200 m/s)

Ces impacts surviennent fréquemment en vol, notamment lors des phases de décollage et d'atterrissage. Ils incluent :

- Collisions avec des oiseaux : bien que considérés comme des chocs mous, leur énergie est élevée en raison de leur masse (environ 2 kg).
- Impacts de grêle : affectent une large surface mais avec une énergie moindre.

4.1.4 Impact à vitesse élevée (200 à 1 000 m/s)

Ce type d'impact concerne principalement les aéronefs militaires, notamment lors d'attaques balistiques.

4.1.5 Impact hyper vitesse (supérieur à 4 000 m/s)

Dans le domaine spatial, les impacts se produisent notamment lorsque des satellites sont frappés par des débris orbitaux à très grande vitesse. L'énergie libérée lors de la collision peut varier

considérablement, et le projectile peut se fragmenter au moment du choc, générant un effet de souffle qui doit être pris en compte dans la modélisation des dommages.

Cette classification permet d'optimiser les stratégies de protection et d'adapter la conception des structures aux risques spécifiques liés aux impacts, garantissant ainsi leur résilience face aux environnements extrêmes de l'espace.

4.2 Importance de l'étude de l'impact

L'étude de l'impact d'un matériau consiste à analyser sa capacité à résister à des sollicitations dynamiques rapides, telles que les chocs, les collisions ou les explosions. Contrairement aux chargements statiques, les impacts engendrent des phénomènes spécifiques, tels que l'inertie, l'endommagement rapide et la fissuration fragile, qui influencent la réponse du matériau.

Cette étude vise à optimiser la conception des structures composites sandwich à cœur en béton polymère afin d'assurer leur sécurité, leur performance et leur durabilité face aux impacts. Elle examine l'effet des chocs à basse vitesse sur divers matériaux composites pour mieux comprendre les mécanismes d'endommagement et adapter les stratégies de renforcement. L'agencement des couches et l'hybridation des matériaux influencent la capacité des structures à absorber l'énergie et à résister aux contraintes. Une meilleure compréhension des mécanismes d'absorption d'énergie et des modes de rupture, tels que la fissuration et le délaminage, permet d'anticiper les défaillances et d'améliorer la fiabilité des structures.

4.2.1 Domaines d'applications du phénomène d'impact

L'analyse de la résistance aux impacts est essentielle dans de nombreux secteurs industriels, où la sécurité et la fiabilité des structures sont primordiales.

1. Aéronautique et spatial

L'étude de l'impact permet d'évaluer la résistance des ailes d'avions et des coques de satellites face aux collisions avec des corps étrangers (oiseaux, grêle, débris spatiaux). Cette analyse est cruciale pour garantir l'intégrité des structures et éviter des défaillances en vol ou en orbite.

2. Automobile

Les essais de collision sont indispensables pour comprendre comment une structure absorbe l'énergie d'un choc et protège les passagers. L'objectif est de développer des matériaux légers et résistants, tels que les composites, afin d'améliorer la sécurité tout en réduisant le poids des véhicules.

3. Construction et génie civil

L'étude de l'impact est essentielle pour évaluer la résistance des bâtiments et des infrastructures aux explosions, aux chocs de véhicules ou aux événements sismiques. Elle permet de concevoir des structures capables de dissiper efficacement l'énergie des impacts et d'assurer la protection des occupants.

4. Sports et équipements sportifs

Les casques de protection (cyclisme, football, moto) sont conçus pour absorber les chocs et limiter les risques de blessures. L'analyse des matériaux et des structures permet d'optimiser leur efficacité et leur durabilité.

5. Énergie (pétrolier, nucléaire)

Les infrastructures énergétiques doivent être protégées contre les impacts et les explosions. L'étude de la résistance des canalisations et des réservoirs permet de prévenir les défaillances dues à la chute d'équipements lourds ou à des événements accidentels.

6. Militaire et défense

Le développement de blindages pour les véhicules et les soldats repose sur l'analyse de la résistance aux éclats d'obus, aux balles et aux chocs violents. L'étude de l'impact permet également d'améliorer la résistance des structures militaires aux effets de souffle des explosions.

7. Micro-électronique

Les appareils électroniques doivent être conçus pour résister aux chocs lors du transport ou en cas de chute. L'étude de l'impact permet de développer des protections adaptées, notamment pour les téléphones portables et les équipements sensibles.

La résistance à l'impact joue un rôle clé dans la conception et la fiabilité des structures dans de nombreux secteurs industriels. Le tableau suivant illustre quelques exemples concrets d'application

Tableau 4.1 Exemples d'applications dans les secteurs industriels

Secteur	Exemples d'application
Aéronautique et spatial	**Résistance des avions aux collisions avec des oiseaux, protection des satellites contre les débris spatiaux**
Automobile	**Essais de collision, optimisation des matériaux pour la sécurité des passagers**
Construction et génie civil	**Protection des bâtiments contre les explosions et les chocs de véhicules**
Sports et équipements sportifs	**Conception de casques de protection absorbant les chocs**
Énergie (pétrolier, nucléaire)	**Sécurisation des infrastructures contre les impacts et les explosions**
Militaire et défense	**Développement de blindages et de structures résistantes aux chocs violents**
Micro-électronique	**Protection des appareils électroniques contre les chutes et les vibrations**

4.3 Les essais d'impact :

Dans le cas de la chute libre, représentation la plus utilisée pour reproduire les essais d'impact, l'énergie d'impact est définie par la hauteur de chute notée h. Celle-ci est déterminée par l'énergie potentielle :

$$Ep = m.g.h \qquad [4.1]$$

avec :

m : la masse du projectile,

g : l'accélération de la pesanteur

De plus, un calcul de la vitesse au moment de l'impact est fait. Nous considérons la conservation de l'énergie au moment de l'impact. Dès lors, nous avons équilibre entre l'énergie potentielle Ep et l'énergie cinétique Ec :

$$Ep = E\,c$$

Avec Ec définie par :

$$Ec = \qquad [4.2]$$

Nous obtenons donc le calcul de la vitesse :

$$v = \qquad [4.3]$$

4.3.1 Impact basse vitesse – définition :

Selon plusieurs auteurs, un test d'impact à basse vitesse correspond à une sollicitation où la vitesse cinétique incidente ne dépasse pas 100 m/s. Abrate [16], dans son étude sur le comportement des matériaux composites stratifiés sous chargement d'impact, précise que les impacts à faible vitesse surviennent lorsque la vitesse d'impact est inférieure à 100 m/s. Par ailleurs, certains chercheurs proposent une classification des tests d'impact basée sur les mécanismes d'endommagement induits par la sollicitation de choc, permettant ainsi une approche plus spécifique de l'analyse des effets de l'impact sur les matériaux.

4.4 Phénomène d'Impact à Basse Vitesse sur les Structures Composites :

L'impact à faible vitesse (1 à 10 m/s) sur les structures composites à base de fibres de carbone ou de verre dans une matrice époxy constitue un défi majeur pour les industries aéronautique, automobile et énergétique. Contrairement aux matériaux métalliques, ces composites anisotropes développent des mécanismes d'endommagement complexes, dont l'évolution est fortement influencée par plusieurs paramètres essentiels :

- **La séquence d'empilement des plis**, qui détermine la répartition des contraintes et la propagation des dommages.
- **L'orientation des fibres** (0°, ±45°, 90°), influençant la résistance aux chocs et la capacité d'absorption d'énergie.
- **La nature des renforts utilisés** (carbone, kevlar ou verre), impactant la rigidité, la ténacité et la tolérance aux dommages.

Cette étude analyse l'influence de ces facteurs sur la tolérance à l'impact et la performance mécanique des structures composites, afin d'optimiser leur conception et leur durabilité face aux sollicitations dynamiques.

4.5 Optimisation de la Résistance à l'Impact à Basse Vitesse

L'amélioration de la tolérance aux impacts à basse vitesse dans les structures composites repose sur plusieurs stratégies d'optimisation, parmi lesquelles l'hybridation et l'ajustement de la séquence d'empilement des plis.

4.6 Hybridation des matériaux

L'hybridation consiste à associer différents types de fibres (carbone, verre, kevlar) au sein d'un même stratifié afin de combiner leurs propriétés spécifiques. Par exemple :

- **Ajout de kevlar** dans un composite carbone/époxy pour améliorer la ténacité et la résistance à la perforation, compensant ainsi la fragilité du carbone.
- **Alternance de plis en verre et en carbone** afin de trouver un équilibre entre rigidité, absorption d'énergie et coût.

Une hybridation bien conçue permet d'augmenter la tolérance aux dommages, de limiter la propagation du délaminage et de renforcer la robustesse globale de la structure sans impact significatif sur la masse.

4.7 Optimisation de la séquence d'empilement

L'orientation des plis joue un rôle clé dans la répartition des contraintes et la résistance aux impacts. En ajustant l'angle des fibres (±45°, ±60°), il est possible de :

- **Améliorer la dissipation des contraintes** et limiter la propagation du délaminage.
- **Favoriser des empilements symétriques et équilibrés**, notamment avec des orientations croisées, pour renforcer la stabilité mécanique et la réponse aux impacts multidirectionnels.

Dans l'analyse d'une structure soumise à un impact à basse vitesse (1–10 m/s), le critère primordial pour évaluer sa fiabilité repose sur sa capacité à absorber l'énergie sans compromettre son intégrité structurelle.

4.8 Critères Énergétiques Avancés pour l'Analyse d'Impact

Les critères énergétiques avancés pour l'analyse d'impact permettent d'évaluer avec précision la dissipation d'énergie et les mécanismes d'endommagement des matériaux soumis à des chocs. En intégrant des paramètres tels que l'énergie absorbée, la vitesse de déformation et la distribution des contraintes, ces critères facilitent la conception de structures plus résilientes et optimisent leur performance face aux sollicitations dynamiques. Ils jouent un rôle essentiel dans divers domaines, notamment l'aéronautique, l'automobile et le génie civil, où la résistance aux impacts est un enjeu majeur.

- **Énergie Absorbée par Endommagement** (ALLDMD)

L'évaluation de la résistance à l'impact des structures composites repose sur l'analyse de plusieurs critères énergétiques fondamentaux, notamment :

- **L'énergie totale absorbée**, correspondant à l'énergie cinétique initiale

$$Ec = \quad , \qquad [4.2]$$

- **L'énergie dissipée par les mécanismes d'endommagement (ALLDMD)**, qui quantifie l'énergie transformée par des phénomènes irréversibles tels que la fissuration, le délaminage ou la plasticité.
- **Le facteur de dissipation**, qui permet d'évaluer l'efficacité de la structure à absorber l'énergie sans rupture brutale.

Dans les simulations numériques (notamment sous Abaqus), l'ALLDMD joue un rôle clé dans l'analyse du comportement des composites soumis à des impacts. Un rapport **ALLDMD/énergie d'impact initial** supérieur à **70 %** indique une bonne tolérance à l'impact, avec une dissipation efficace de l'énergie. À l'inverse, un ratio inférieur à **50 %** traduit une absorption insuffisante, augmentant le risque de rupture brutale.

L'analyse conjointe de l'énergie totale absorbée et de l'énergie dissipée par l'endommagement permet ainsi de caractériser la capacité d'une structure composite à résister aux impacts. Cette approche est essentielle dans la conception avancée des matériaux composites, où l'optimisation des mécanismes de dissipation d'énergie constitue un levier majeur pour améliorer la sécurité, la durabilité et la performance des structures dans des secteurs exigeants tels que l'aéronautique, l'automobile et le génie civil.

4.9 Paramètres définissant les Critères Énergétiques pour l'Évaluation de l'Impact

4.9.1 Endommagement (Damage) :

Il correspond à la perte progressive des propriétés mécaniques d'un matériau sous l'effet de sollicitations (chocs, fatigue, traction, etc.). Il se traduit par l'apparition de microfissures, de délaminages ou de zones plastifiées.

4.9.2 Énergie de dissipation du dommage (ALLDMD) :

C'est l'énergie absorbée ou dissipée par le matériau lorsqu'il subit un endommagement. Elle ne peut pas être récupérée. Cette variable est extraite dans ABAQUS pour évaluer la gravité du dommage.

4.9.3 Énergie totale (E_totale) :

C'est la somme des différentes énergies impliquées dans le système, comme :

- énergie cinétique (ALLKE) ;

- énergie interne (ALLIE) ;

- travail externe (ALLWK) ,

4.9.4 Facteur critique : défini par :

Facteur critique = % [4.4]

-Ce rapport permet d'évaluer la part de l'énergie absorbée par endommagement par rapport à l'énergie totale appliquée.

Ce rapport permet d'évaluer la part de l'énergie absorbée par endommagement par rapport à l'énergie totale appliquée. Un ratio élevé indique une forte sensibilité aux dommages.

4.10 Analyse des dommages par impact à basse vitesse sur structures composites

Les composites en graphite présentent **peu ou pas de déformation plastique** lors d'un impact à faible vitesse, en raison de la faible déformation à la rupture des fibres et de la fragilité de la matrice époxy. Contrairement aux matériaux métalliques, ces composites dissipent l'énergie d'impact par des mécanismes de rupture spécifiques, notamment :

- **Le délaminage**, qui se traduit par une séparation progressive des couches du stratifié.
- **La fissuration de la matrice**, qui fragilise la structure et peut entraîner une perte de rigidité.
- **La rupture des fibres**, qui constitue l'un des modes de défaillance les plus critiques.

L'importance des dommages induits par un impact à faible vitesse est directement corrélée aux paramètres géométriques et à la séquence d'empilement des stratifiés composites. Ces dommages, majoritairement internes et non détectables visuellement, requièrent systématiquement des techniques de contrôle non destructif pour une caractérisation fiable.

Des recherches expérimentales menées par divers auteurs ont évalué le comportement de plaques composites soumises à des impacts par chute de masse. Les essais ont porté sur :

- Des composites à matrice époxy démontrant d'excellentes performances structurelles
- Des systèmes hybrides carbone/verre présentant une résistance optimale aux sollicitations dynamiques

L'analyse par ultrasons a permis une cartographie précise des zones endommagées, révélant :

1. La morphologie des dommages internes
2. L'étendue des zones affectées
3. Les mécanismes de propagation des défauts

4.10.1 Implications industrielles :

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une optimisation poussée des paramètres de conception des composites, notamment par :

- L'adaptation des séquences d'empilement
- Le développement de systèmes hybrides
- L'intégration de méthodes de contrôle avancées

Cette approche permet d'améliorer significativement la tolérance aux impacts et d'assurer la fiabilité des structures dans des conditions de service critiques.

4.11 Formulation mathématique d'impact :

Les chocs à faible énergie (CFE) induisent des endommagements importants dans les structures composites stratifiées. Ces endommagements sont internes et non détectables par un simple examen de la surface du stratifié. Ils peuvent conduire à une dégradation considérable de la rigidité du matériau et d'autant plus lorsque de tels chocs sont répétés. Une analyse locale de l'évolution dans le temps des mécanismes d'endommagement est très difficile. L'équilibre dynamique de l'impacteur est obtenu par la loi de Newton par [16] :

$$\ddot{w}+ = 0 \qquad [4.5]$$

Où : mi et ẅ sont la masse et l'accélération respectivement de l'impacteur. Il convient donc de noter que le vecteur force de contact Fc doit être calculé avant que le mouvement structurel puisse être analysé. La solution est obtenue en employant la méthode de Newmark [48] d'intégration dans le temps. Le déplacement initial et la vitesse de l'impacteur sont wi = 0 et w. i = 0. Il est supposé que la loi de contact d'Hertz soit applicable à la phase de chargement, sont expression est donnée par la Tan et Sun [48].

$$= \quad \text{pour le chargement} \qquad [4.6]$$

$$= \quad \text{pour le déchargement} \qquad [4.7]$$

Dans ce qui précède, αi(t)= (t)-(t) représente la profondeur de l'indentation. wi et ws respectivement, les déplacements de l'impacteur et le déplacement du point sur la surface moyenne de la plaque au-dessous du point de contact à l'instant t. Fm est la force de contact maximum juste avant le déchargement, αm est l'indentation quand la force de contact atteint sa valeur maximale Fm. L'indentation permanente est déterminée par l'expression suivante :

= ***0*** quand <

=quand≥ [4.8]

Est connu comme l'indentation critique. L'expression de k, de la raideur de contact modifiée, dans l'équation (3.15) pour les matériaux composites est donnée par :

k=4/3 [4.9]

Il est instructif de noter que k, la rigidité de contact modifiée, basée sur la théorie proposée par Yang et al [23].

Avec : ri, et sont le rayon, le coefficient de Poisson, et le module d'élasticité de l'impacteur,

est le module transversal de la plus haute couche du composite. Le déplacement (et la vitesse de l'impacteur à la fois d'une étape (n+1) sont déterminés en appliquant schéma d'intégration de Newmark [16]:

= + [(1- α)(+ α]Δt

= + + Δt + [(½- β) + β [4.10]

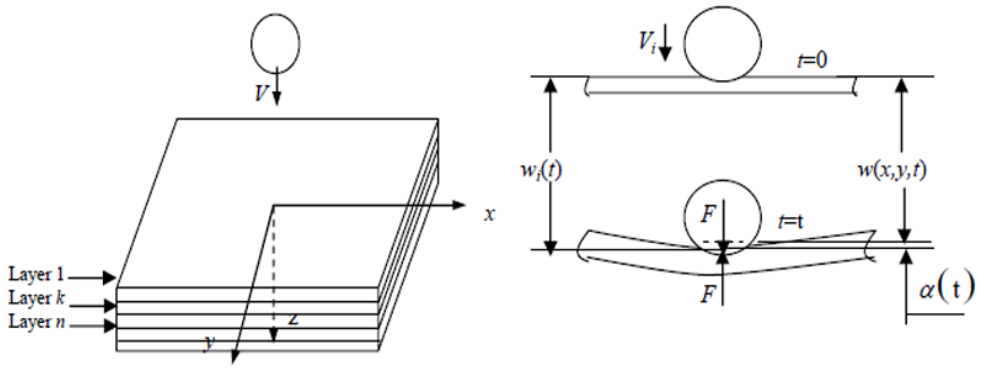


Figure 4.1 : Plaque composite laminé et impacteur [16]

Pour évaluer la solution de cette équation transitoire, de Newmark, les coefficients sont choisis comme α= ½, β = 1/4, et Δt par 1/10th de la période naturelle. En substituant l'expression ci-dessus pour wi et sa dérivée temporelle dans l'équation [4.6], [4.7] et les équations du mouvement définies par [4.5], on obtient les expressions suivantes implicites de la force de contact au pas de temps n +1: Pour la phase de chargement :

= [4.11]

= k

= k{[+[(½- β) + β]-(

= k{[+(n +[(½- β) – β(/)] -

= k[q-– (

Pour la phase de déchargement :

= =

= [4.12]

Ou :

(t)=-

q = (+ (ẇi)n + ([(½- β)

= β mi , = /(

4.11.1 Modèle géométrique avec l'impacteur :

Le modèle géométrique constitué d'une plaque en composite starifiée ;

Longueur ….. 250 mm

Largeur ….. 40 mm

Epaisseur ….. 16 mm comportant 8 plis croisés avec différentes séquences d'empilement

L'impacteur est de forme sphérique de masse 1kg, et projeté avec une vitesse de 10 m/s

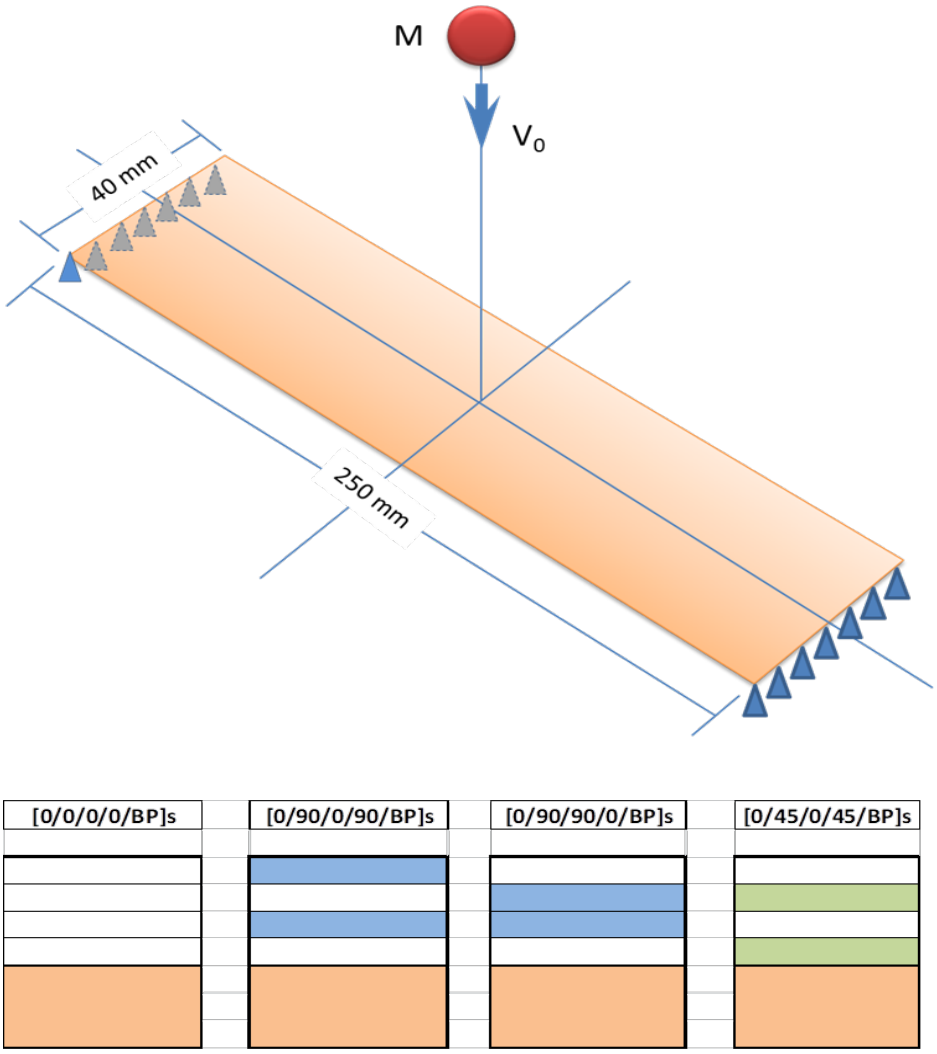


Figure 4.2a : Poutre de test avec l'impacteur et les séquences d'empilements utilisés

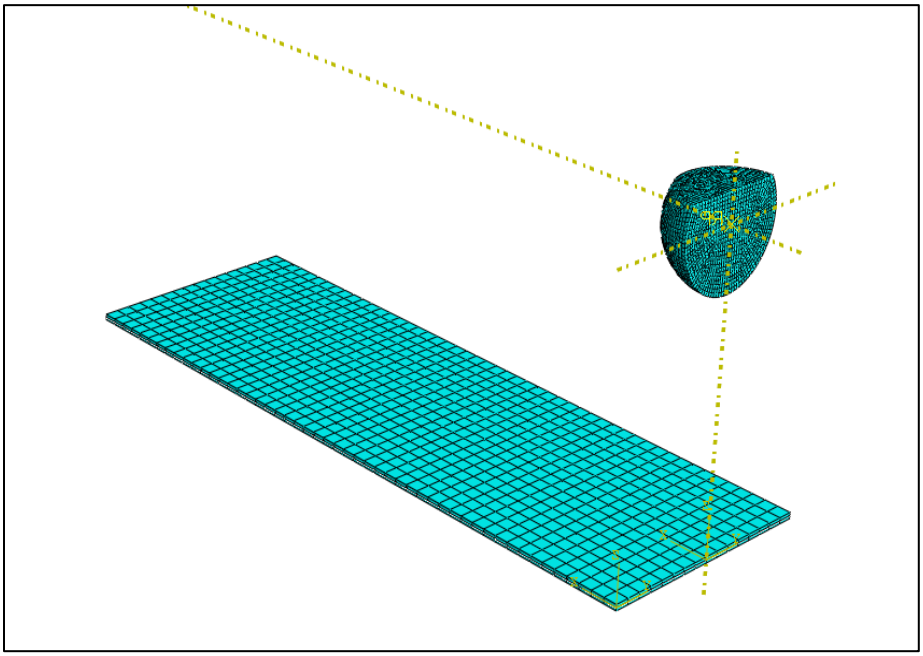


Figure 4.2b : Modèle EF de la moitié de la Poutre avec l'impacteur

4.11.2 Les caractéristiques des matériaux :

1- Composites stratifies

Les données relatives aux trois types de fibres utilisées sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

		Glass/Epoxy	G70/Epoxy	Kevlar/Epoxy
Modules de l'Ingénieur MPa	Densité T/mm^3	1,8 E-9	1.59E-09	1.40E-09
	E1	34600	294500	76000
	E2	4300	6345	5500
	E3	4300	6345	5500
	v12	0.38	0.23	0.34
	v13	0.4	0.38	0.4
	v23	0.4	0.38	0.4
	G12	1700	4897	2300
	G13	1450	4215	1800
	G23	1450	4215	1800
Hashin Stress MPa	XT	700	985	1400
	XC	400	690	300
	TT	17	29	40
	YC	60	98	120
	LS	35	49	80
	TS	35	49	40
Domag-Evolution	LSTF	10	100	75
	LSCF	4	80	45
	TSTF	0.25	1	1.5
	TSCF	1	13	5
Stabilisation	/	0.001	0.00015	0,0002

Tableau 4.2 Caractéristiques mécaniques des matériaux composites

Pour les couches en aluminium AA7075-T651, le critère de plasticité utilisé est celui de Johnson et Cook. Les données correspondantes, extraites de l'article (*), sont synthétisées dans les tableaux ci-dessous.

2- Aluminium AA7075-T651

Jonson and Cook- Plasticity Criteria- Aluminum-----AA7075-T651 (*)

Tableau 4.3 : les caractéristiques de l'Aluminium

Données du Critère - Jonson and Cook- Plasticité Critère- Aluminium----AA7075-T651 (*)			
E = 70GPa ;	v=0.3	Damage for Ductile Metals- Jonson and Cook	
A	520E+6		
B	477E+6	d1	0.0961
N	0.52	d2	0.049
m	1	d3	-3.465
Melting Temp	893	d4	0.016
Transition Temp	293	d5	1.099
Rate dependent C	0.001	Ref-strain rate	1
Epsilon dot	0.0005	Thermal Specific Heat	910

(*) Reference

Gabriele Imbalzano a, Phuong Tran b, Tuan D. Ngo b,⇑, Peter V.S. Lee a "A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings " Department of Mechanical Engineering, The University of Melbourne, VIC, Australia-

http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.038 -0263-8223/ 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved

Tableau 4.4 :les caractéristique de béton polymère

Béton polymère	
Densité T/mm^3	1.9^E-9
Module de Young MPa	7000
Coefficient de Poisson	0.3
Critère d'endommagement (Damage initial fragile)	Stmax = 5 MPa
	Scmax= -40 MPa
Évolution de dommages	Gf = 0.5
Stabilisation	0.002
Amortissement visco- alpha	0.01

4.12 Analyse de l'Influence de la séquence d'empilement des couches composites sur la résistance en impact des sandwiches en béton polymère

Objectif Analyser l'influence de l'orientation des fibres sur la résistance à l'impact d'une structure sandwich à peaux en fibre de verre.

L'effet de la séquence d'empilement sur la résistance à l'impact a été étudié sur un composite verre/époxy soumis à un impact à faible vitesse (10 m/s) à l'aide d'un impacteur sphérique d'un rayon de 10 mm. Quatre configurations symétriques ont été considérées : [0/0/0/0/BP]s, [0/90/0/90/BP]s,

[0/90/90/0/BP]s et [0/45/0/45/BP]s. Pour toutes les configurations, l'énergie totale imposée (ETOTAL) a été fixée à 50 000 MPa. Les résultats montrent des différences marquées en termes de dissipation d'énergie (ALLMDM) et de facteur d'endommagement critique.

4.12.1 Résultats et Discussions

Les résultats des Modèles numériques sur Abaqus sont récapitulés sur le tableau suivant :

TABLEAU 4.5 : Les résultats de l'effet de la séquence d'empilement

Empilement	**[0/0/0/0/BP]s**	**[0/90/90/0/BP]s**	**[0/90/0/90/BP]s**	**[0/45/0/45/BP]s**
ETOTAL	50000	50000	50000	50000
ALLMDM	43194.15	33008.97	33042.91	34194.27
Facteur Critique (%)	86.3	66	66.1	68.4

Un impact à basse vitesse sur une structure composite peut provoquer plusieurs types de dommages tel que : fissuration matricielle, délaminage entre les couches, rupture des fibres et indentation permanente. Parmi ces mécanismes, le délaminage est l'un des plus critiques, car il compromet l'intégrité structurelle sans forcément être détectable visuellement.

L'architecture de l'empilement des plis (ou *stacking sequence*) joue un rôle crucial dans la réponse au choc. Un empilement symétrique et équilibré peut améliorer la résistance à l'impact en répartissant les contraintes de manière plus homogène. De plus, le nombre total de couches et l'épaisseur de chaque pli influencent la capacité d'absorption d'énergie et la propagation du délaminage. Un empilement avec des couches intercalées à différentes orientations agit comme une barrière à la croissance des fissures interlaminaires.

L'influence de la séquence d'empilement sur la résistance à l'impact d'un composite verre/époxy a été analysée lors d'un impact à faible vitesse (10 m/s) avec un impacteur sphérique de 10 mm de rayon. Quatre configurations symétriques ont été étudiées : [0/0/0/0/BP]s, [0/90/0/90/BP]s, [0/90/90/0/BP]s et [0/45/0/45/BP]s, sous une énergie totale imposée de 50 000 MPa.

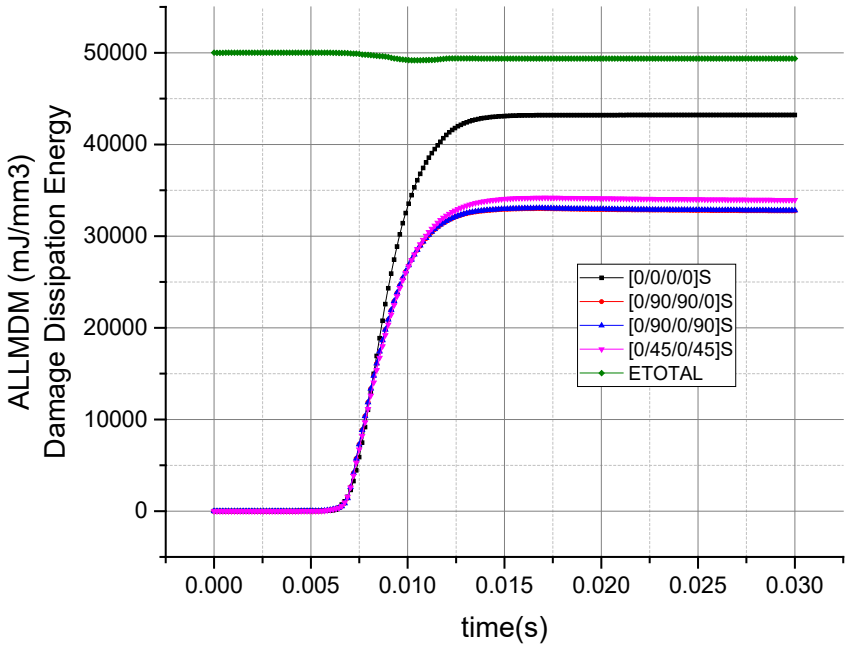


Figure 4.3 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD et de l'énergie TOTALE pour les quatre empilements

Les résultats révèlent des variations notables en matière de dissipation d'énergie (ALLMDM) et de ratio d'endommagement critique.

La séquence [0/0/0/0/BP]s se distingue par ses performances optimales, affichant une dissipation d'énergie maximale de 43 194,15 mJ/mm³ et un facteur critique de 86,3%. L'orientation uniforme des fibres facilite une distribution efficace des contraintes longitudinales, améliorant ainsi l'absorption énergétique. À l'inverse, les configurations [0/90/0/90/BP]s et [0/90/90/0/BP]s enregistrent des valeurs ALLMDM similaires, avoisinant 33 000 mJ/mm³, avec un facteur critique au voisinage de 66 %. L'arrangement croisé des couches engendre une répartition hétérogène des contraintes, favorisant la délamination entre les couches perpendiculaires. La disposition [0/45/0/45/BP]s montre une amélioration relative, atteignant une énergie dissipée de 34 194,27 mJ/mm³ et un facteur critique de 68,4%. L'insertion de couches inclinées à ±45° renforce la résistance au cisaillement et limite partiellement la propagation des fissures inter laminaires.

4.12.2 Effet des types de renforts utilisés :

Cette partie a comme but de modéliser et analyser le comportement mécanique de trois types de composites stratifiés à fibres longues — verre/époxy, carbone/époxy et kevlar/époxy — présentant un empilement symétrique de type [0/0/0/0/BP] symétrique, soumis à un impact à basse vitesse. Les performances de ces matériaux sont ensuite comparées à celles d'un modèle équivalent en aluminium afin d'évaluer leur résistance et leur efficacité sous sollicitation.

Tableau 4.6 valeurs des facteurs critique pour trois composites comparés à l'aluminium

Matériaux	Verre/époxyde	Carbone/époxyde	Kevlar/époxyde	ALUMINIUM
ETOTAL	50000	50000	50000	50000
ALLMDM	43194.15	33408.11	39519.21	0
Facteur critique (%)	86.4	66.8	79	0

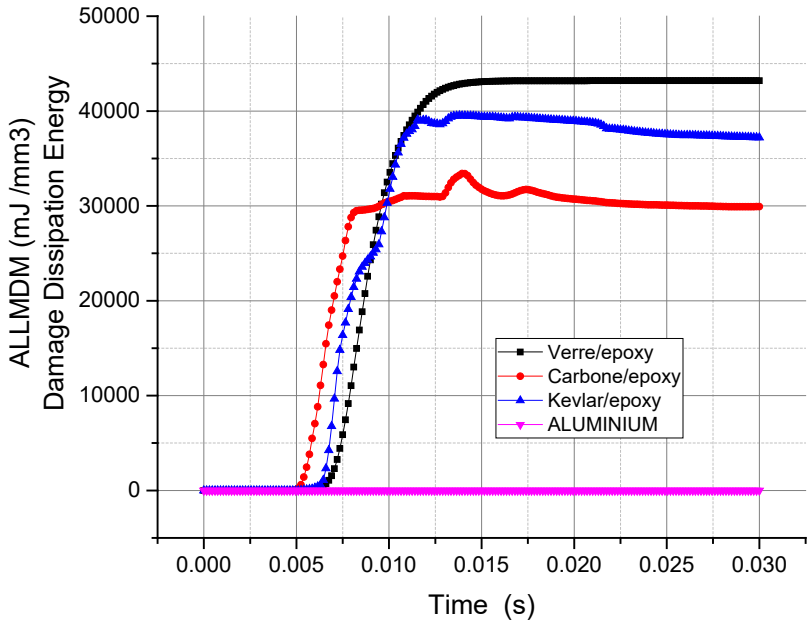


Figure 4.4 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD pour les sections composites stratifies

4.13 Analyse de l'Influence du Matériau de Renforcement sur la Résistance à l'Impact à faible Vitesse

L'étude comparative de la résistance à l'impact à faible vitesse a été menée sur trois types de composites stratifiés – verre/époxy, carbone/époxy et kevlar/époxy – et confrontée aux résultats obtenus pour une plaque isotrope en aluminium, soumise à une même énergie d'impact de 50 000 mJ.

4.13.1 Résultats des composites stratifiés :

Les analyses révèlent que le composite verre/époxy présente la meilleure capacité d'absorption d'énergie, avec une valeur ALLDMD de 43 194,15 mJ/mm³ et un facteur critique de 86,4 %, attestant d'une dissipation efficace de l'énergie et d'une excellente tolérance aux dommages. Le Kevlar/époxy se distingue par sa grande ténacité, affichant une absorption de 39 519,21 mJ/mm³ et un ratio critique de 79 %, ce qui le rend particulièrement adapté aux structures exposées à des impacts répétitifs. À l'inverse, le carbone/époxy présente une capacité d'absorption d'énergie plus faible (33 408,11

mJ/mm³) et un ratio critique de 66,8 %, soulignant sa sensibilité à la délamination malgré sa rigidité élevée.

D'après les résultats trouvés on peut tirer les remarques pour chaque matériau dans les points suivant :

1. **Verre/époxy**
   - Meilleure absorption d'énergie parmi les composites étudiés
   - Excellente tolérance aux dommages
   - Structure plus souple entraînant des déformations importantes
   - Forte dissipation d'énergie par mécanismes irréversibles (fissuration, rupture locale)
2. **Kevlar/époxy**
   - Grande ténacité caractéristique
   - Performance optimale sous impacts répétitifs
   - Équilibre remarquable entre résistance mécanique et absorption des chocs
3. **Carbone/époxy**
   - Rigidité la plus élevée
   - Meilleures performances mécaniques globales
   - Capacité élevée d'absorption d'énergie élastique
   - Absorption d'énergie plus faible que les autres composites

4.14 Interprétation Comparative du Graphe de Déplacement U3 en Fonction du Temps

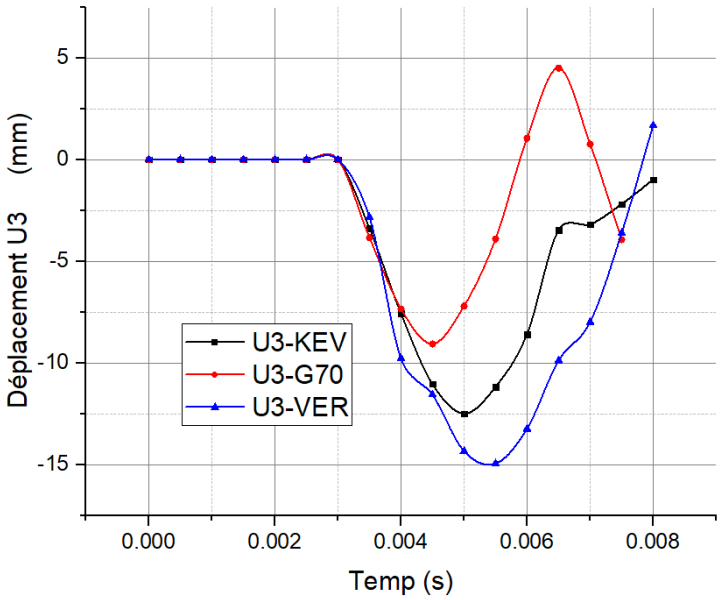


Figure 4.5 : Déplacement du centre de la poutre en fonction de temps d'impact

L'analyse des déplacements verticaux enregistrés lors de l'impact met en évidence des différences significatives dans le comportement dynamique des trois matériaux composites étudiés G70, Kevlar, et la fibre de Verre.

Le G70 se distingue par un déplacement relativement faible de 8.5 mm traduisant une rigidité élevée et une capacité à limiter la déformation initiale sous l'effet de la charge d'impact. Cependant, le rebond très marqué observé après l'impact, parfois supérieur à la position initiale, indique une faible capacité de dissipation de l'énergie et une rigidité élevée.

Une structure qui restitue une grande partie de l'énergie absorbée par un retour élastique important est souvent moins efficace pour transformer cette énergie en endommagement interne contrôlé. Cela peut entraîner des ruptures soudaines ou une fragilité accrue en cas d'impact répété ou de sollicitations sévères.

Le Kevlar présente un déplacement intermédiaire de 11 mm, accompagné d'une déflexion et un saut modéré. Ce comportement traduit un bon équilibre entre rigidité et absorption d'énergie.

- La déformation reste contenue, limitant les risques de rupture immédiate.
- L'énergie d'impact est partiellement dissipée par des mécanismes internes tels que la fissuration de la matrice ou les micro-délaminations, assurant une meilleure tolérance aux dommages.

Ce type de réponse est typique des matériaux conçus pour des applications où la résilience et la résistance à la fatigue sous chocs répétés sont essentielles, notamment dans les blindages ou les structures aéronautiques.

Le verre, quant à lui, présente la plus grande déformation, ce qui le rend plus vulnérable aux dommages sévères, bien qu'il ait une forte capacité de dissipation d'énergie à travers des mécanismes irréversibles comme la fissuration. Chaque matériau est donc adapté à des usages spécifiques en fonction de ses propriétés mécaniques.

4.14.1 Résultats

Les matériaux composites diffèrent significativement en termes de rigidité, d'absorption d'énergie et de résistance aux dommages. Le carbone (G70) est très rigide mais dissipe peu d'énergie, tandis que le Kevlar offre un bon compromis entre résistance et absorption des chocs, le rendant idéal pour les applications nécessitant durabilité et résilience. Le verre se déforme davantage, ce qui le rend plus fragile face aux dommages, mais il dissipe efficacement l'énergie grâce à des mécanismes irréversibles comme la fissuration. Chaque matériau a des usages adaptés à ses propriétés mécaniques.

4.15 Impact de l'hybridation des matériaux sur les propriétés de résistance à l'impact.

L'hybridation des matériaux constitue une approche innovante permettant d'optimiser leurs propriétés mécaniques en combinant différentes compositions pour répondre à des exigences spécifiques. En intégrant plusieurs types de matériaux dans une même structure, il est possible de tirer parti des avantages de chacun afin d'améliorer la résistance, la rigidité, l'absorption d'énergie et la durabilité. Cette stratégie est particulièrement pertinente dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile et du génie civil, où la recherche de performances accrues et de légèreté est essentielle.

Dans ce contexte, l'étude de l'effet de l'hybridation sur les propriétés mécaniques s'avère capitale pour mieux comprendre son influence sur la résistance aux contraintes et aux sollicitations dynamiques. Elle permet également d'identifier les configurations optimales en fonction des applications envisagées, garantissant ainsi une meilleure fiabilité et une réduction des risques de défaillance.

4.15.1 Mécanismes d'absorption d'énergie :

La plaque en aluminium ne présente pas une capacité d'absorption d'énergie significative selon ce critère (ALLDMD = 0, facteur critique = 0), l'énergie étant principalement dissipée par plastification localisée, sans recourir aux mécanismes internes complexes caractéristiques des matériaux composites. Contrairement à ces derniers, l'aluminium se distingue par une réponse plus isotrope, avec une déformation plastique concentrée et nettement visible.

Alors que l'aluminium absorbe l'énergie par plastification, les composites la dissipent à travers une diversité de mécanismes internes, tels que la fissuration de la matrice, la rupture des fibres et le délaminage, conférant à ces matériaux des propriétés d'atténuation des impacts plus sophistiquées.

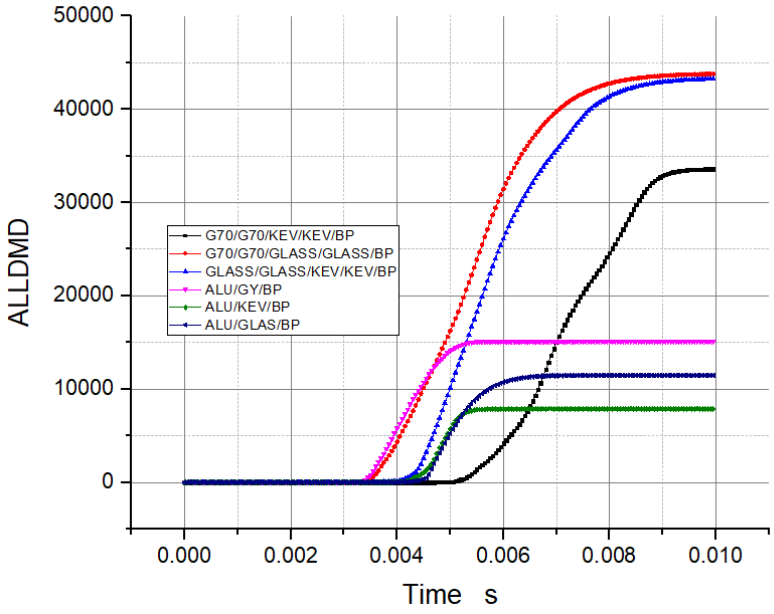


Figure 4.6 Variation de l'énergie absorbée par endommagement ALLDMD pour les sections hybrides en aluminium et les trois composites

Dans les composites hybrides, l'ajout d'une couche d'aluminium dans la partie supérieure de la poutre entraîne une réduction significative de l'énergie absorbée par l'endommagement ainsi que du temps d'impact. Le composite hybride Alu/G70/BP présente l'absorption d'énergie la plus élevée (1500 J) sur une durée de 0,0015 s, tandis que le composite Alu/Kevlar/BP absorbe une énergie moindre (6000 J) sur une durée légèrement plus courte de 0,0013 s.

Remarque

Cette analyse comparative révèle que le choix du matériau composite doit s'effectuer en fonction :

- Des sollicitations mécaniques attendues
- De la nécessité d'absorption ou de dissipation d'énergie
- De la résistance aux dommages visibles et internes

Chaque matériau présente des avantages spécifiques qui le rendent plus adapté à certaines applications qu'à d'autres.

4.16 Conclusion

En conclusion, la séquence d'empilement influence de manière significative le comportement à l'impact. L'empilement unidirectionnel optimise l'absorption d'énergie dans l'axe principal, tandis que les configurations transversales et angulaires offrent une meilleure robustesse multidirectionnelle, bien que leur rendement énergétique soit légèrement diminué.

Le composite verre/époxy offre la meilleure absorption d'énergie et une excellente tolérance aux dommages. Le Kevlar/époxy se distingue par sa grande ténacité, adapté aux impacts répétitifs. En revanche, le carbone/époxy, bien que très rigide, présente une absorption plus faible et une sensibilité à la délamination.

L'intégration de kevlar dans un composite carbone/époxy permet d'améliorer la ténacité et la résistance à la perforation, compensant ainsi la fragilité intrinsèque du carbone. Par ailleurs, l'alternance de plis en verre et en carbone offre un compromis optimal entre rigidité, absorption d'énergie et maîtrise des coûts, garantissant une meilleure adaptation aux exigences mécaniques et économiques des structures composites.

L'analyse du graphe met en évidence des différences essentielles entre ces matériaux composites, notamment en termes de rigidité, d'absorption d'énergie et de tolérance aux dommages. Le G70 se distingue par sa grande rigidité, mais présente une faible capacité de dissipation d'énergie. À l'inverse, le Kevlar offre un équilibre optimal entre résistance mécanique et absorption des chocs, le rendant particulièrement adapté aux applications nécessitant une forte résilience et une durabilité accrue.
Quant au verre, il subit la plus grande déformation, révélant une structure plus souple et donc plus vulnérable aux dommages structurels sévères, notamment en cas d'impacts répétés. Son faible rebond tardif traduit une forte dissipation d'énergie, probablement induite par des mécanismes irréversibles tels que la fissuration ou la rupture locale. Bien que cette absorption d'énergie puisse être bénéfique dans certaines situations, elle reste à analyser en fonction des contraintes d'application.

Le composite à base de fibres de carbone offre les meilleures performances mécaniques grâce à sa capacité élevée à absorber l'énergie élastique, limitant ainsi le délaminage et la rupture des fibres. En comparaison, le composite en fibres de verre présente une défaillance influencée par la densité élevée de fibres, tandis que le composite en fibres d'aramide affiche une performance inférieure en raison de son anisotropie, qui affecte la dissipation homogène de l'énergie d'impact.

L’aluminium dissipe l’énergie principalement par plastification localisée, sans recourir aux mécanismes internes complexes propres aux composites. Contrairement à ces derniers, il présente une réponse plus isotrope avec une déformation plastique concentrée et visible. Les composites, quant à eux, dissipent l’énergie à travers divers mécanismes internes tels que la fissuration de la matrice, la rupture des fibres et le délaminage, offrant ainsi une meilleure atténuation des impacts.

CONCLUSION GENERAL

L'étude met en évidence l'influence de la séquence d'empilement sur la distribution des contraintes et des déformations dans les stratifiés composites. Les résultats confirment que les contraintes maximales se situent aux extrémités des stratifiés, tandis que les contraintes de cisaillement sont concentrées au centre de la poutre. La comparaison entre les modèles numériques et la théorie des stratifiés valide la fiabilité des méthodes de modélisation par éléments finis. Bien que les modèles simplifiés offrent un bon compromis entre précision et rapidité de calcul, le modèle Block 3D reste essentiel pour l'analyse détaillée des effets locaux et la prédiction du risque de délaminage. Ces conclusions renforcent l'importance des approches tridimensionnelles pour une meilleure compréhension et optimisation des structures composites.

Le rapport de rigidité entre les peaux et l'âme joue un rôle clé dans la répartition des efforts mécaniques d'une structure sandwich. Une âme trop souple compromet la transmission des forces, entraînant des déformations excessives et un risque de rupture accru. À l'inverse, un rapport de rigidité élevé permet aux peaux de supporter efficacement les efforts normaux, tandis que l'âme assure la transmission des contraintes de cisaillement. L'optimisation de ce paramètre est donc primordiale pour garantir la légèreté, la rigidité et la durabilité des structures sandwichs, en particulier dans les secteurs exigeants comme l'aéronautique et le génie civil.

L'efficacité des structures sandwich dépend du dosage en résine dans leur âme en béton polymère. Un excès réduit la rigidité et la transmission des efforts, tandis qu'un dosage équilibré optimise la cohésion, la résistance et la durabilité. L'optimisation de cette formulation est essentielle pour améliorer les performances en génie civil. Le choix des matériaux composites et de leur séquence d'empilement joue un rôle essentiel dans leur résistance mécanique et leur capacité d'absorption d'énergie. Le carbone offre une rigidité élevée mais une faible dissipation énergétique, tandis que le Kevlar présente un bon équilibre entre résistance et absorption des chocs. Le verre, bien que plus fragile, assure une dissipation efficace grâce à ses mécanismes de fissuration. Par ailleurs, l'organisation des couches influe sur le comportement à l'impact : un empilement unidirectionnel maximise l'absorption dans un axe spécifique, alors que les configurations transversales et angulaires offrent une meilleure robustesse multidirectionnelle. Parmi les combinaisons étudiées, le composite verre/époxy se révèle optimal pour l'absorption d'énergie et la tolérance aux dommages, tandis que le Kevlar/époxy excelle en résistance aux impacts répétés. En revanche, le carbone/époxy, bien que rigide, montre une sensibilité accrue au délaminage.

L'optimisation de ces paramètres est donc cruciale pour adapter les composites aux exigences structurelles et fonctionnelles de diverses applications industrielles. L'ajout de Kevlar dans un

composite carbone/époxy améliore la ténacité et la résistance à la perforation, compensant la fragilité du carbone. L'alternance de plis de verre et de carbone optimise la rigidité, l'absorption d'énergie et le coût. Le carbone offre une rigidité élevée mais absorbe mal l'énergie, tandis que le Kevlar combine résistance et absorption des chocs. Le verre dissipe bien l'énergie mais est plus vulnérable aux dommages. Les composites dissipent l'énergie via fissuration et délaminage, contrairement à l'aluminium qui se déforme localement (plastification), offrant un comportement plus isotrope.

Références

[1] G. Martínez-Barrera, E. Vigueras-Santiago , O. Gencel and H.E. Hagg Lobland “ polymer concretes: a description and methods for modification and improvement>journal of materials education vol. 33 (1-2): 37 - 52 (2011)

[2] Raman Bedi,1 RakeshChandra,1 andS.P. Singh , « Review Article Mechanical Properties of Polymer Concrete « Hindawi Publishing Corporation Journal of Composites Volume 2013,

[3] P. Mani, A.K. Gupta and S. Krishnamoorthy, « Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes>, INT.JJ~DHESION AND ADHESIVES VOL.7 NO.3 JULY 1987

[4] B.Venkatesh U.G Student Department of civil engineering « EXPERIMENTAL STUDY ON POLYMER CONCRETE WITH EPOXY RESIN . » International Journal of Pure and Applied Mathematics;Volume 119 No. 17 2018, 3129-3138

[5] Jakub S, Krzysztof St, , Mateusz K, Małgorzata S, Mateusz W, Tomasz P, , Krzysztof G, Klaudiusz F ,Piotr O "The Influence of Resin Volume Fraction on Selected Properties of Polymer Concrete " Materials 2024, 17, 6142.

[6] Aziz. I. A, Hashim A , Yassen A, M .Ibrahim Ali," Mechanical properties of sand modified resins used for bonding CFRP to concrete substrates"International Journal of Sustainable Built Environment, Received 5 April 2016; accepted 8 June 2016

[7] A. Bourguiba, E. Ghorbel, W. Dhaoui," Résistance des mortiers résine époxy/sable recyclé à la diffusion des ions chlorures"Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167678

[8] G.Mirouzia, B. Redjela , R. Jauberthieb « Formulation et comportement mécanique de micro-bétons à matrice de résine polyester » Université d’Annaba ; Novembre 2012, Nature & Technologie

[9] Bezazi A.R., El Mahi A., Berthelot J.-M. & Bezzazi B., "Analyse de l’endommagement des stratifiés en flexion 3-points -Influence de la séquence d’empilement-". XVème Congrès français de mécanique, Nancy, 3-7 septembre, 2001.

[10] Bezazi A., Thèse de Doctorat “ Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwiches en flexion 3-points, 2003.

[11] Davidson B. D., Kruige R. & Konig M., "Three-dimensional analysis of center-delaminated Unidirectional and Multidirectional single-leg bending specimens", Composites Science and Technology, 54, 385-394, 1995.

[12] Sun C. T. & Jen K. C., 1987. "On the effect of matrix cracks on laminate strength.” Journal of reinforced Plastics and Composites, 6, pp. 208-222.

[13] Tsai L.-R. & Liu C.-H., 1995. "A comparison between two optimisation methods on the stacking sequence of fibres -reinforced composite laminate", Composites Structures, 55, 3, pp. 515-25.

[14] Park J.-H., Hwang J.-H., Lee C.-S. & Hwang W., 2001. "Stacking sequence of composite laminates for maximum strength using genetic algorithms. Composites Structures, 52, pp. 217-31

[15] Avalle, M. and Belingardi G., 1995. "A theoretical approach to the optimization of flexural stiffness of symmetric laminates", Composite Structures, 31, pp. 75-86.

[16] Serge Abrate, Impact on composite structures, Cambridge University Press, 2005

[17] Umar Farrok, Finite Element Simulation of Low Velocity Impact Damage Morphology in Quasi_Isotropic Composite Panels Under Variable Shape Impactors, European Journal of Scientific Research - ISSN 1450-216X Vol.25 No.4 (2009), pp.636-648, Euro-Journals Publishing, Inc. 2009

[18] P.E. Reed, L. Beva, Impact damage in a composite material, Polymer composites, Vol.14,N4,PP.286-291,2004

[19] George Staab, Laminar composite, Edition Butterworth-Heinemann, 1999

[20] Kim MJ, Gupta A., Finite element analysis of free vibrations of laminated composite plates. Int J Analyt Exp Modal Anal, 1990; 5(3):195–203

[21] Ramin Hosseinzadeh el al, Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts, Composites Science and Technology 66 (2006) 61–68

[22] Cesim Atas, Onur Sayman, An overall view on impact response of woven fabric composite plates, Composite Structures 82 (2008) 336–345

[23] F.J. Yang, W.J. Cantwell, Impact damage initiation in composite materials, Composites Science and Technology 70 (2010) 336–342

[24] W. A. de Morais et al, Effect of the Fiber Reinforcement on the Low Energy Impact Behavior of Fabric Reinforced Resin Matrix Composite Materials, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng, October-December 2003, Vol. XXV, No. 4 / 325

[25] Giovanni Belingardi, Roberto Vadori, Influence of the laminate thickness in low velocity -impact behavior of composite material plate, Composite Structures 61 (2003) 27–38

[26] Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson, Low velocity impact induced damage evaluation and its effect on the residual flexural properties of pultruded GRP composites, Composite Structures 81- (2007) 195–201

[27] Cherchari Saadia, « Étude comparative du comportement d'un béton polymère à matriceorganique thermodurcissable et thermoplastique », mémoire master, université de M'sila,2016

[28] Latelli H., (2017). Etude du comportement mécanique du béton polymère renforcé par des fibres végétales et déchets minéraux, Génie Civil, Université Mohamed Boudiaf - M'sila

[29] Oussama Elalaoui, « optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde », thèse de doctorat, université de Tunis ELManar, février 2012.

[30] Baali Hafida, « étude de l'effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur le comportement mécanique du béton polymère », mémoire master, université de M'sila, juin 2014.

[31] Cherchari Saadia, « Étude comparative du comportement d'un béton polymère à matriceorganique thermodurcissable et thermoplastique », mémoire master, université de M'sila,2016

[32] Boussaha S ; Medareg-narou m ; « Etude des propriétés du béton à base de polymère. » Département de : Génie Civil & Hydraulique Université 08 Mai 1945 de Guelma

[33] Bougssir hameza « Contribution à l'étude de l'endommagement en statique du béton polymère a fibre naturelles et végétales- Approche expérimentale et numérique- Thèse Doctorat 2019 – Laboratoire des Mines Université de Tébessa

[34] Saber benferdi, « Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différents approches mathématiques », mémoire magister, Université Mentouri Constantine 2010.

[35] Laurent Gornet, Belkacem N,Chettouane o, « Comportement en rupture des plaques composites sous impact à basse vitesse », mémoire magister, Université d'Oran 2Mohamed Ben Ahmed, Maintenance en Electromécanique, Septembre 2021

[36] Djebloun Youcef. « Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites ». Mémoire de Magister, Université de Biskra ,2004.

[37] Dorlot j.m, baillon j.p, masounave J. Des matériaux 2ème édition, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, p467,1986.

[38] Agrawal b.d., broutman L.J. "Analysis and performance of fiber composite". Second edition, John Wiley and Sons, New York, p449, 1990.

[39] RIGAL J.P. « Matériaux composites », teknea, Belma, France, p 288, 1989.

[40] Berthelot J.-M. (1999). Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis, springer-Verlag, New York, Paris.

[41] Blaga A., (1975). Les thermoplastiques, Division des recherches en bâtiment, Conseil National de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 158F, Ottawa

[42] Blaga A., (1975). Les plastiques thermodurcissables, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 159F, Ottawa

[43] Khedidja HACINI, « etude du comportement mécanique en flexion 3 points d'un matériau composite par les éléments finis » magister, Matériaux Avancés, Année 2009

[44] Nadia Behlouli, « les matériaux composites », cours des matériaux composites », Université de Strasbourg.

[45] Joel Cugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005

[46] Louis Berreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger, « L'industrie française des matériaux composites », rapport final Rév 2 du 13 mai 2002.

[47] Belkacem N,Chettouane o, « Comportement en rupture des plaques composites sous impact à basse vitesse », mémoire magister, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Maintenance en Electromécanique, Septembre 2021

[48] Mohamed aboussaleh, modélisation du problème du contact lors du choc à faible énergies pour les composites stratifies en graphite/époxy, thèse de doctorat, Montréal, canada, novembre 1998

[49] Reid Evrard Ngouama Ngolo 2014, «Mise en Œuvre et Caractérisation du Comportement Mécanique d'un Eco-Matériau Sandwichs », Mémoire de Master, Université de Technologie de TROYES.