



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université 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 : RAIS LYESSE

Sujet

Flambement non linéaire des tubes composites

Présenté et soutenu publiquement, le 25/06/2024, devant le jury composé de:

M. Boursas Farid
M. Harkati el-Haddi
M.Labed Abderahim

Docteur
Professeur
Docteur

Président
Rapporteur
Examineur

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Harkati el Haddi, mon directeur de recherche, pour son encadrement hors pair, sa patience infinie et ses conseils avisés qui ont été d'une aide inestimable tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Sa bienveillance et son expertise ont guidé mes pas et m'ont permis de mener à bien ce projet avec rigueur et passion.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury,

Dr. A Labeled, Dr. F. Boursas, pour avoir pris le temps d'évaluer mon travail et pour leurs remarques constructives qui me permettront de l'améliorer encore.

Je suis également reconnaissant envers mes parents, ma famille et mes collègues qui m'ont soutenu et encouragé sans faille tout au long de mon parcours universitaire. Leur présence bienveillante et leurs précieux conseils ont été une source de motivation constante.

Un grand merci à mes amis qui ont toujours cru en moi et m'ont apporté un soutien moral indéfectible, en particulier pendant les moments difficiles. Leur amitié a été un véritable réconfort et une source d'inspiration.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier tous mes professeurs du département de Génie civil pour leur enseignement de qualité et leur disponibilité. Leurs cours et leurs conseils ont été essentiels à ma formation et à mon développement intellectuel.

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué à mon succès et qui ont fait de ces années d'études une expérience enrichissante et inoubliable.

Sommaire

Résumé

Chapitre 1 : Introduction

1. Préambule Fondamental.....	1
1.1. Introduction.....	2
1.2. Généralités sur les Matériaux Composites	3
1.2.1. Caractéristiques générales	3
1.2.2. Exemples de matériaux composites.....	4
1.3. Classification des matériaux composites	5
1.3.1. Composites à fibres	5
1.3.2. Composites à particules	6
1.3.3. Classification suivant la nature des constituants.....	6
1.3.3.1. Composites à matrice organique.....	6
1.3.3.2. Composites à matrice métallique.....	6
1.3.3.3. Composites à matrice minérale.....	6
1.4. La structure des composites.....	7
1.5. Effet d'empilement dans les matériaux composites	7
1.6. Fondements du Flambement.....	9
1.6.1. Le Flambement	10
1.6.2. Résistances des matériaux	10
1.7. Mode d'écrasement stable et instable.....	12
1.8. Généralités sur le code de calcul - ABAQUS.....	13
1.9. Etude bibliographique.....	14
1.10. Problématique	18
1.11. Questions de recherche et Objectifs	19
1.12. Méthodologie.....	19

Chapitre 2 : Formulation analytique du phénomène de flambement des structures en coques

2.1. Le flambage des structures	21
2.1.1. Définitions	21
2.1.2. Types de flambage.....	22
2.2. Analyse Mécanique des Coques Cylindriques de Faible Épaisseur	23
2.2.1. Théorie des coques minces	24
2.2.2. Développement de la théorie des coques.....	24
2.2.2.1. Théorie de Donnell pour les coques cylindriques minces	24
2.2.2.2. Equations non-linéaires d'équilibre de Donnell	25

Chapitre 3 : Impact des paramètres de conception sur la résistance au flambage des tubes sous compression

1. Introduction.....	29
3.1. Effet de la géométrie de la section sur la charge critique de flambement dans les tubes comprimés	29
3.1.1. Définition et concept	29
3.1.2. Géométries et formes utilisées.....	30
3.1.3. Paramètres influençant le comportement en flambement.....	30
3.1.4. Modes de flambement	31
3.1.5. Conception de tubes comprimés.....	31
3.1.6. Formulation Numérique et Outils de simulation	32

3.1.7. Résultats et Discussions.....	32
3.1.8. Récapitulation	34
3.1.9. Conclusion	35
3.2. Effet de l'élanement sur la charge critique de flambement dans les tubes Comprimés.....	37
3.2.1. Charge critique et Elancement.....	37
3.3. Effet de diamètre du Tube sur la charge critique d'un tube en Aluminium	41
3.1.1. Introduction.....	41
3.1.2. Exposé du Problème	41
3.1.3. Résultats et Discussions.....	42
3.1.4. Impact du diamètre sur la charge critique d'un tube.	42
3.1.5. Conclusion	43

Chapitre 4 : Effet de la séquence d'empilement sur la charge critique de flambement dans les composites en verre

4.1. Introduction.....	44
4.2. Types d'empilements croisés	44
4.3. Avantages des empilements croisés	45
4.4. Exemples d'applications.....	45
4.5. Données de Problème	46
4.6. Modèle Numérique	47
4.7. Résultats et discussions.....	49
4.4. Conclusion.	52

Chapitre 5 : Effet du matériau sur le comportement au flambement des sections tubulaires

5.1. Introduction.....	54
5.1.1. Propriétés mécaniques des matériaux.....	54
5.1.2. Comportement au flambement des matériaux courants.....	54
5.1.3. Facteurs supplémentaires influençant le comportement au flambement.	55
5.2. Structures et Matériaux.....	55
5.2.1. Les Alliages	55
5.2.2. Matériaux Composites	56
5.2.2.1. Fibres de carbone.....	57
5.2.2.2. Kevlar	58
5.2.2.3. Fibres en E-Glass.....	58
5.2.2.4. Fibres de graphite	59
5.3. Techniques d'investigation.....	59
5.4. Résultats et discussions.....	59
5.5. Conclusion	62
5.6. Amélioration du comportement au flambement des structures tubulaires	62
Conclusion.....	63
Références.....	65

Liste des figures

Figure 1.1: Constituants d'un Matériau composite	4
Figure 1.2 : Flambement d'un élément de poutre (colonne) pour diverses conditions d'appuis.....	11
Figure 1.3: Mode d'écrasement Stable et Instable.....	12
Figure 2.1: Types d'instabilité	24
Figure 2.2: Coque cylindrique mince	26
Figure 2.3: Elément de coque cylindrique	26
Figure 2.4: Mode Axisymétrique.....	26
Figure 3.1: Charges critiques pour les 10 premiers modes pour les 6 types de sections	34
Figure 3.2: Premières Charges critiques pour les 6 types de sections	34
Figure 3.4: Charges critiques avec l'Elancement des dix premiers modes de flambement	39
Figure 3.5: Charges critiques avec la hauteur des tubes.....	40
Figure 3.6a : Tube maillé par des éléments coques S4R	42
Figure 3.6b : Les diamètres testés	42
Figure 3.7 : Variation de la charge critique avec le rayon des tubes	43
Figure 4.1 : Géométrie du tube d'essai.....	47
Figure 4.2: les séquences d'empilement testées	48
Figure 4.3: Les différentes séquences d'empilement.....	50
Figure 4.4: Variation des 5 Premières Charges critiques pour les 5 séquences empilements testées	51
Figure 4.5: Variation des charges critiques en fonction de la séquence d'empilement	52
Figure 5.1: Fibre de Carbone	58
Figure 5.2: Fibre de Kevlar	59
Figure 5.3: Fibre de Verre	59
Figure 5.4: Le Graphite	60
Figure 5.5: Variation des Charges critiques pour les 5 matériaux avec les angles d'orientation des fibres	62

Liste de tableaux

Tableau 1.1 : Exemples de matériaux composites	4
Tableau 3.1 : Présentant les différentes formes géométriques testées avec toutes les propriétés géométriques de chaque forme	31
Tableau 3.2 : Charges critiques pour les 10 premiers modes pour les 6 types de sections.....	33
Tableau 3.3 : Premières Charges critiques pour les 6 types de sections.....	35
Tableau 3.4 : Longueurs des tubes et les élancements correspondants	38
Tableau 3.5 : Charge critique avec l'Elancement des cinq premiers modes de flambement	39
Tableau 3.6 : Charges critiques avec l'Elancement des premiers modes de flambement	40
Tableau 3.7 : Charges critiques avec les diamètres des tubes	43
Tableau 4.1: les 10 premières charges critiques pour chaque séquence d'empilement	51
Tableau 5.1: Données de Matériaux	61
Tableau 5.2: Variation des Charges critiques pour les 5 matériaux avec les angles d'orientation des fibres	61

Liste de Symboles

u : déplacement axial
v : déplacement circonférentiel
y : déplacement radial ou mode de flambage
X : coordonnée axiale
Y : coordonnée circonférentielle
L : longueur de la coque
R : rayon de la coque
t : épaisseur de la coque
N_x : Effort axiale
N_y : Effort circonférentielle
N_{xy}: Effort de cisaillement
M_i : moment suivant i
M_{xθ} : moment de torsion
P : pression
λ : nombre d'onde circonférentielle
E : module de Young
ν : coefficient de Poisson
G : module de cisaillement
ρ : Masse volumique du matériau composite ou de pli unidirectionnel.
E_f. E_m : Modules de Young des fibres et de matrice respectivement.
EL : Modules d'élasticité dans le sens des fibres.
θ° : Ongle d'empilement (0° ou 90°)
l_k : longueur de flambement
S4R : l'élément coque du code Abaqus
MPa : Méga Pasqual
D: diamètre du tube
EF : éléments finis par le code Abacus
ST0, ST1, ST2, ST3 et ST4 : série de stratifiés
A60 – E335 : tipe d'acier
AA7075 : tipe l'alliage d'aluminium

Résumé

Dans le domaine de l'ingénierie, le flambement de tube représente un phénomène importante à prendre en compte lors de la conception et l'analyse des structures, en particulier celle qui intègrent des composants tubulaires. Ce phénomène survient lorsque la charge axiale appliquée à un tube dépasse sa capacité de la charge critique, ce qui entraîne une déformation latérale ou un flambement. Dans le cas des tubes en matériaux composites, la compréhension du flambement devient encore plus complexe en raison de la nature hétérogène de ces matériaux. En effet, les propriétés mécaniques des matériaux composites varient en fonction de la composition et de la disposition des constituants, telque les fibres et la matrice. Cette variabilité influence considérablement le comportement au flambement des tubes composites. Les facteurs influençant la résistance au flambement incluent les propriétés des matériaux, la géométrie de la section transversale du tube et la séquence d'empilement des matériaux composites. De plus, la géométrie de la section transversale et la séquence d'empilement des matériaux jouent un rôle crucial dans la capacité d'un tube à résister au flambement.

Cette étude s'appuie sur une analyse numérique détaillée pour examiner l'effet de chaque facteur sur le flambement des tubes. L'objectif est de comprendre l'influence précise de chaque paramètre sur ce phénomène. Des simulations numériques ont été menées pour étudier l'impact individuel de chaque facteur sur le flambement des tubes.

Abstract

In engineering, tube buckling is a crucial phenomenon to take into account when designing and analysing structures, particularly those incorporating tubular components. This phenomenon occurs when the axial load applied to a tube exceeds its critical load capacity, resulting in a lateral deformation or buckling. In the case of composite tubes, understanding buckling becomes even more complex due to the heterogeneous nature of these materials. Indeed, the mechanical properties of composite materials vary according to the composition and arrangement of constituents, such as fibres and matrix. This variability has a considerable influence on the buckling behaviour of composite tubes. Factors influencing buckling resistance include material properties, tube cross-section geometry, and the stacking sequence of the composite materials. In addition, sectional geometry and material stacking sequence play a crucial role in a tube's ability to resist buckling.

This study uses detailed numerical analysis to examine the effect of each factor on tube buckling. The aim is to understand the precise influence of each parameter on this phenomenon. Numerical simulations were carried out to study the individual impact of each factor on tube buckling.

ملخص

في مجال الهندسة، يمثل انبعاج الأنابيب ظاهرة حاسمة يجب أخذها في الاعتبار عند تصميم وتحليل الهياكل، خاصة تلك التي تتضمن مكونات أنبوبية. تحدث هذه الظاهرة عندما يتجاوز الحمل المحوري المطبق على الأنبوب سعة الحمل الحرجة، مما يؤدي إلى تشوه جانبي أو انبعاج. في حالة الأنابيب المصنوعة من مواد مركبة، يصبح فهم الانبعاج أكثر تعقيدًا بسبب الطبيعة غير المتجانسة لهذه المواد. في الواقع، تختلف الخواص الميكانيكية للمواد المركبة اعتمادًا على تركيب وترتيب المكونات، مثل الألياف والمصفوفة. يؤثر هذا التباين بشكل كبير على سلوك التواء الأنابيب المركبة. تشمل العوامل التي تؤثر على مقاومة الانبعاج خصائص المواد، وهندسة المقطع العرضي للأنبوب، وتسلسل تكديس المواد المركبة. بالإضافة إلى ذلك، تلعب هندسة المقطع العرضي وتسلسل تكديس المواد دورًا حاسمًا في قدرة الأنبوب على مقاومة الانبعاج.

تستخدم هذه الدراسة التحليل العددي التفصيلي لفحص تأثير كل عامل على التواء الأنبوب. الهدف هو فهم التأثير الدقيق لكل معلمة على هذه الظاهرة. تم إجراء عمليات محاكاة عددية لدراسة التأثير الفردي لكل عامل على التواء الأنبوب.

Préambule Fondamental

Le flambement des tubes en acier et en composite est un phénomène crucial dans la conception de structures soumises à des charges de compression, où une surcharge peut causer une déformation en flexion latérale. Les tubes en acier et en composite présentent des modes de flambement différents en raison de leurs propriétés distinctes de résistance et de rigidité. Comprendre les influences du tube, de la géométrie, des matériaux et de l'anisotropie sur le flambement est essentiel pour assurer la stabilité des structures. En analysant les paramètres géométriques et les propriétés des matériaux, il est possible de concevoir des tubes capables de résister efficacement au flambement, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité des structures.

CHAPITRE 1

1.1 INTRODUCTION

La mécanique des structures vise à optimiser les formes et dimensions des éléments d'une construction, afin de les rendre résistants aux sollicitations de manière économique. Les structures minces sont largement utilisées pour leur capacité à supporter et transmettre les charges tout en restant légères. Parmi ces structures, les coques cylindriques sont couramment employées dans divers secteurs tels que l'agroalimentaire, l'aéronautique, le génie civil et l'industrie spatiale. Cependant, leur faible épaisseur les rend sensibles au flambage, un phénomène d'instabilité. Une meilleure compréhension de ces phénomènes est essentielle pour éviter des erreurs de dimensionnement. Les méthodes de dimensionnement des coques minces peuvent encore être améliorées grâce aux outils numériques et aux méthodes expérimentales permettant d'élargir notre compréhension du flambage.

Le flambement est un phénomène d'instabilité qui se produit dans les structures soumises à des charges de compression. Lorsqu'un élément élancé, tel qu'une poutre ou une colonne, est sollicité par une charge axiale critique, il peut s'écarter de sa position initiale, entraînant potentiellement une défaillance catastrophique. Ce phénomène est particulièrement important à comprendre et à maîtriser lors de la conception et du dimensionnement des structures pour garantir leur stabilité et leur sécurité, cependant ce phénomène est non lié à la limite d'élasticité du matériau, est principalement influencée par la géométrie du tube, sa longueur et ses conditions d'appui. La géométrie et la forme de la section jouent un rôle important dans la résistance au flambement, l'épaisseur du tube joue également un rôle important dans la détermination de la charge critique. Les sections avec un moment d'inertie plus élevé, comme les sections circulaires, rectangulaires larges ou en I, permettent d'augmenter la charge critique du tube. L'épaisseur du tube joue également un rôle important, un tube plus épais ayant un moment d'inertie plus élevé et une résistance au flambement accrue. Il est important de prendre en compte les imperfections géométriques du tube lors de la conception de structures à base de tubes comprimés.

Les tubes composites sont souvent utilisés dans des applications aérospatiales, industrielles et de génie civil en raison de leur légèreté, de leur résistance et de leur capacité à supporter des charges élevées. Cependant, leur comportement en flambement doit être soigneusement analysé pour éviter tout risque de défaillance. Lorsque des tubes composites sont soumis à des charges de compression, des modes de flambement spécifiques peuvent se produire en fonction de

facteurs tels que l'orientation des fibres, la géométrie du tube, la présence d'entailles ou de défauts, et les propriétés du matériau composite lui-même. Les ingénieurs et les concepteurs doivent prendre en compte ces aspects pour garantir la sécurité et la performance optimale des structures tubulaires composites. En somme, la compréhension du flambement des tubes composites est essentielle pour concevoir des structures robustes et fiables dans divers domaines d'application.

1.2 Généralités sur les Matériaux Composites

Le mot « Composites » peut être interprété de manière large pour signifier qu'il est composé de plusieurs parties distinctes. Toutefois, l'expression 'matériau composite' est couramment utilisée dans un sens plus spécifique, qui sera expliqué en détail dans ce chapitre. Pour le moment, nous pouvons définir un matériau composite comme une combinaison de deux substances différentes, qui, en s'associant, se complètent et donnent naissance à un matériau dont les performances globales sont meilleures que celles des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites, au sens élargi du terme, sont illustrés dans le tableau ci-après

1.2.1 Caractéristiques générales

Un matériau composite est généralement composé d'une ou de plusieurs phases discontinues dispersées au sein d'une phase continue. Lorsque les phases discontinues sont de différentes natures, on qualifie le composite d'hybride. La phase discontinue, souvent plus rigide, possède des propriétés mécaniques qui surpassent celles de la phase continue. Cette dernière est désignée sous le terme de matrice, tandis que la phase discontinue est connue comme le renforcement ou le matériau de renforcement.

1.2.2 Exemples de matériaux composites

Tableau 1.1. Exemples de matériaux composites

	Constituants	Domaine d'application
1 : Composite à matrice organique (papier ; carton) Panneau de particules Panneau de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatique Stratifié Plastique renforcés	Résine/charges/fibres cellulosique Résine/copeaux de bois Résine/fibre de bois Résines souples/tissus Élastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre ; de carbone etc. Résine/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2: Composite à matrice Minéral Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibre de carbone Céramique/fibre de céramique	Génie civil Aviation, espace, sport, biomédecine, etc. Pièces thermomécaniques
3: Composites a matrice métallique	Aluminium/fibre de bore Aluminium/fibre de Carbone	Espace
4: Sandwiches Peaux Ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

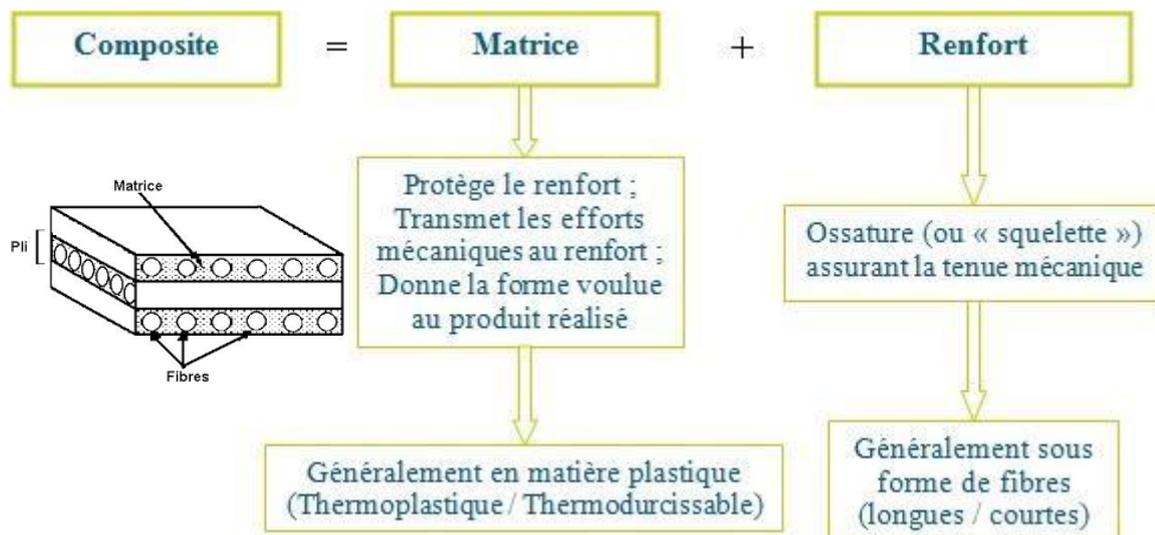


Figure 1.1 Constituants d'un Matériau composite

Les matériaux composites tirent leurs propriétés uniques de : La nature et les performances des composants qui les constituent, Leur agencement spatial au sein du matériau, Leurs interactions mutuelles et leur synergie. Pour analyser un matériau composite, il est crucial de déterminer : Les spécificités et les attributs des éléments constitutifs, La géométrie et la répartition du renfort, La relation entre la matrice et le renfort. La géométrie du renfort est caractérisée par des critères tels que sa forme, ses dimensions, la densité de renfort, son arrangement et son orientation. Malgré l'impact de ces paramètres sur les propriétés du composite, les modèles théoriques se limitent souvent à certains d'entre eux en raison de la complexité des phénomènes impliqués. Par exemple, on représente souvent la forme du renfort par des formes géométriques simples comme des sphères ou des cylindres. La quantité de renfort, exprimée en fraction volumique ou fraction massique, joue un rôle prépondérant dans la définition des propriétés du composite. Pour un taux de renfort donné, la manière dont il est distribué dans le composite est tout aussi essentielle. Une distribution équilibrée assure une uniformité des propriétés, rendant le matériau homogène peu importe le point de mesure. En revanche, une distribution inégale peut conduire à une rupture anticipée dans les zones faiblement renforcées, affaiblissant la résistance du matériau. Dans les composites à renfort fibreux, l'orientation des fibres est un facteur déterminant de l'anisotropie du matériau. Cette caractéristique est fondamentale dans les composites, permettant de moduler l'anisotropie du produit fini grâce à une conception et une fabrication sur mesure pour atteindre les propriétés

1.3 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composantes [30].

1.3.1 Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme discontinues. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur [30]:

- La nature des constituants
- La proportion des constituants
- L'orientation des fibres

1.3.2 Composites à particules

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait [30].

1.3.3 Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche [30].

Parmi ces composites, nous pouvons citer :

1.3.3.1 Composites à matrice organique (résine, charge) Avec :

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Des fibres organiques ; kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

1.3.3.2 Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane)

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

1.3.3.3 Composites à matrice minérale (céramique)

- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules métalliques : cermets
- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique.

1.4 La structure de composites

Un matériau composite est un assemblage ou un mélange hétérogène d'au moins deux composants, non miscibles mais ayant une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion. Ces composants se complètent pour former un matériau possédant des propriétés avantageuses que les éléments individuels ne possèdent pas. Les composites sont largement utilisés dans divers secteurs industriels en raison de leurs excellentes propriétés spécifiques

Voici les éléments constitutifs d'un matériau composite :

1. Matrice :

- La matrice est la phase continue qui entoure et maintient les renforts. Elle peut être en résine, en métal ou en polymère.

- Par exemple, le béton armé est un composite constitué de béton (matrice) et d'une armature en acier.

2. Renforts :

- Les renforts sont l'armature qui reprend l'essentiel des efforts mécaniques. Ils peuvent être sous forme de fibres (courtes ou longues) ou d'autres structures (comme des billes de verre).

- Les renforts peuvent être classés selon :

- Leur composition : métal, verre, polymère, etc.

- Leur forme : fibres courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).

- Leur disposition : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

3. Charges et additifs (optionnels) :

- Des charges (comme le gravier dans le béton) ou des additifs peuvent être ajoutés pour améliorer certaines propriétés du matériau composite.

En résumé, la structure d'un matériau composite résulte de l'association synergique de ces éléments, permettant d'obtenir des propriétés mécaniques spécifiques et d'optimiser la performance du matériau dans différentes applications industrielles

1.5 Effet d'empilement dans les matériaux composites

Dans le domaine des matériaux composites, l'empilement désigne l'agencement ordonné des couches renforcées par des fibres, chacune orientée selon un angle spécifique. Cette configuration stratifiée est déterminante pour les propriétés mécaniques du composite, influençant sa rigidité et sa résistance. Les matériaux composites, constitués d'une matrice (souvent une résine) et de renforts (typiquement des fibres), tirent leur performance de cette

synergie entre composants. L'empilement est donc une étape clé dans la conception de composites, permettant d'adapter le matériau aux exigences spécifiques de chaque application, qu'il s'agisse d'aéronautique, d'automobile ou de construction. En somme, l'empilement est l'art d'harmoniser force et flexibilité dans un matériau composite.

L'effet d'empilement dans les matériaux composites stratifiés est un aspect crucial de leur conception et de leur comportement mécanique. Voici quelques informations pertinentes sur ce sujet :

1. Optimisation des empilements dans les structures composites stratifiés :

- L'article intitulé "Optimisation des empilements dans les structures composites stratifiées avec arrêts de plis" propose une méthode pour concevoir de manière optimale des structures composites stratifiées avec des arrêts de plis. Le concept clé est la table de drapage, qui décrit la séquence d'arrêts de plis assurant la transition entre un empilement maître épais et un empilement plus fin. Un algorithme évolutionnaire est utilisé pour optimiser ces tables de drapage, permettant de satisfaire des règles de conception industrielles

- En bref, l'optimisation de la séquence d'arrêts de plis permet d'appliquer des règles de conception sans pénaliser significativement le comportement en raideur et la masse de la structure.

2. Influence de l'empilement des couches :

- Dans les matériaux composites, l'empilement des couches (nature des couches, orientation, séquence d'empilement, etc.) conditionne la structure de la matrice de rigidité. Différents types de stratifiés sont étudiés, et l'attention est portée sur les matériaux avec des orientations différentes par rapport aux axes de référence du stratifié.

- L'effet d'empilement peut avoir un impact significatif sur les propriétés mécaniques du matériau composite.

3. Effet de bord :

- L'effet de bord est fréquemment rencontré dans les structures composites. Il est lié à l'existence de contraintes inters laminaires aux bords libres des stratifiés. Ces contraintes peuvent entraîner un délaminage dans les stratifiés, ce qui peut rapidement conduire à la ruine du matériau

En résumé, l'empilement des couches dans les composites a un impact significatif sur leurs propriétés mécaniques et leur comportement. Il est essentiel de bien comprendre et d'optimiser l'empilement pour obtenir des performances optimales dans les applications réelles

1.6 : Fondements du Flambement

Le flambage est un phénomène d'instabilité d'une structure élastique qui pour échapper à une charge importante

Et très nocif particulièrement pour les structures minces à grand élancement, dites à faible raideur de flexion, sollicité principalement en compression, provoquant une déformation dans le sens perpendiculaire à l'axe de la sollicitation appliquée, donnant une forme d'un accordéon. En effet, ce phénomène se produit à une charge critique correspondante à une contrainte nominale inférieure à la contrainte de rupture du matériau, et la progression de cette charge ne peut mener qu'à une rupture précoce ou une flèche importante de la structure. Une illustration de flambement d'une structure cylindrique en composite est montrée ci-dessous.

La prise en compte de ce phénomène, qui est défini comme étant un phénomène d'instabilité élastique, s'avère crucial dans le dimensionnement des structures. La théorie classique des stratifiés demeure incapable de le résoudre, vue qu'elle n'admet pas les déformations latérales et prend en compte uniquement les déplacements en membrane.

La résolution de ce problème réside dans le développement des équations combinant les équations des déplacements en membrane avec celles qui permettent de déterminer la déformée latérale (cisaillement transverse), d'où la nécessité de considérer les coordonnées de tous points de la structure après déformation.

Au final, le flambement est un problème de flexion ce qui signifie que l'inertie de la structure affecte sensiblement leur réponse. De plus, la rigidité est un paramètre déterminant, d'où un matériau ayant un module d'Young E élevé, il est capable de reprendre plus les efforts qui lui ont imposés. La longueur de l'élément structurel joue aussi un rôle important ; plus la structure est élancée, elle devient plus susceptible à ce phénomène d'instabilité et son effet est en dépendance également du type de liaisons aux extrémités, en effet, la longueur de flambement ainsi obtenue peut être augmentée ou réduite en fonction des conditions aux limites pour une même longueur de la structure.

Pour mieux assimiler le phénomène d'instabilité « flambage », il s'avère nécessaire de présenter un aperçu des principaux concepts et définitions de l'équilibre élastique stable et instable dans les structures

1.6.1 Le Flambement

Le **flambage** est la tendance qu'a un matériau soumis à une force de compression longitudinale à fléchir, et donc à se déformer dans une direction perpendiculaire à la force appliquée.

1.6.2 Résistances des matériaux :

Dans le domaine de la résistance des matériaux, le **flambage** est la tendance qu'a une poutre sollicitée en compression longitudinale à fléchir, et donc à se déformer dans une direction perpendiculaire à la force appliquée.

Prenez par exemple une règle de plastique flexible. Si vous tenez cette règle par les extrémités et tirez, la force que vous exercez devra produire dans la règle des contraintes égales à la résistance mécanique à la traction du plastique qui la compose avant qu'elle ne se rompe. Par contre, si vous tenez cette règle entre les paumes de vos mains et poussez, celle-ci, au lieu de prendre la sollicitation gentiment de manière longitudinale, finira par plier et se brisera beaucoup plus facilement que celle sollicitée en traction. C'est ce phénomène que l'on nomme le flambage.

Le flambage se produit d'autant plus facilement que la poutre est longue et de faible section. La tendance au flambage dépend aussi du type d'attache de la poutre. Même si le terme *poutre* est employé ici, certaines hypothèses de la théorie des poutres (hypothèse des petits déplacements) doivent être abandonnées pour que le modèle fournisse un résultat crédible. Nous devons accepter une théorie du second ordre car les déplacements ne sont pas infinitésimaux.

Ainsi, la charge critique à partir de laquelle il y a risque de rupture par flambage peut être calculée par la **formule d'Euler** : $F = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2}$

Avec

- E est le module de Young du matériau ;
- I est le moment quadratique de la poutre ;
- l_k est la longueur de la flambement de la poutre ;

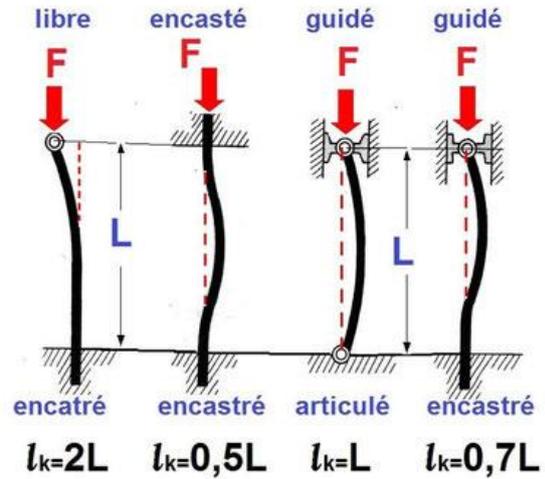
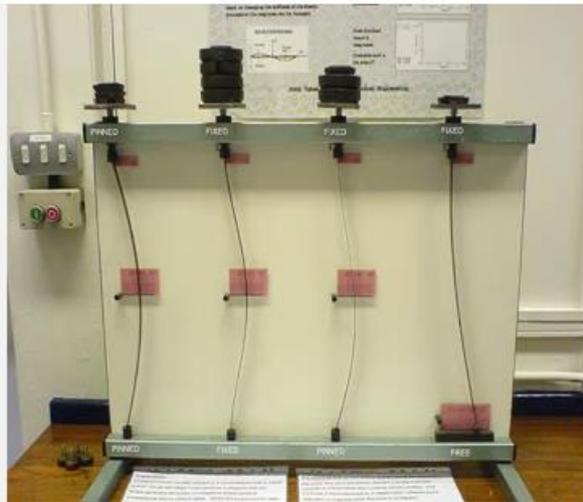


Figure 1.2 : Flambement d'un élément de poutre (colonne) pour diverses conditions d'appuis

Une expérience de démonstration des modes de flambage d'Euler. Cette expérience montre comment les conditions limites (rotule, encastée, libre) influent la charge critique d'une poutre fine (dans cette expérience, toutes les poutres sont identiques à leurs conditions aux limites près)

Le facteur l_k représente une longueur équivalente à celle d'une poutre rotulée-rotulée. Il s'agit de la distance séparant deux points d'inflexions de la poutre. Ainsi,

- Poutre rotulée aux deux bouts, $l_k = 1 * L$, la longueur de la poutre ;
- Poutre encastée aux deux bouts, $l_k = 0,5 * L$;
- Poutre encastée-rotulée, $l_k = 0,7 * L$;
- Poutre encastée-libre, $l_k = 2 * L$

1.7 : Mode d'écrasement stable et instable

Deux modes d'écrasement en compression axiale peuvent se produire en fonction de la dimension géométrique et des propriétés mécaniques du matériau : le mode d'écrasement stable et le mode d'écrasement instable. La figure 1.3 illustre la courbe caractéristique (force - déplacement) de ces deux types d'écrasement. Il est évident que l'énergie dissipée, représentée par l'aire sous la courbe (force - déplacement), est beaucoup plus faible lors de l'écrasement en mode instable que lors de l'écrasement en mode stable. Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation progressive de plis dans les structures en métal. Contrairement au mode d'écrasement stable, peu d'énergie peut être dissipée en mode d'écrasement instable. Du point de vue de l'absorption d'énergie, il est essentiel d'avoir un mode d'écrasement stable.

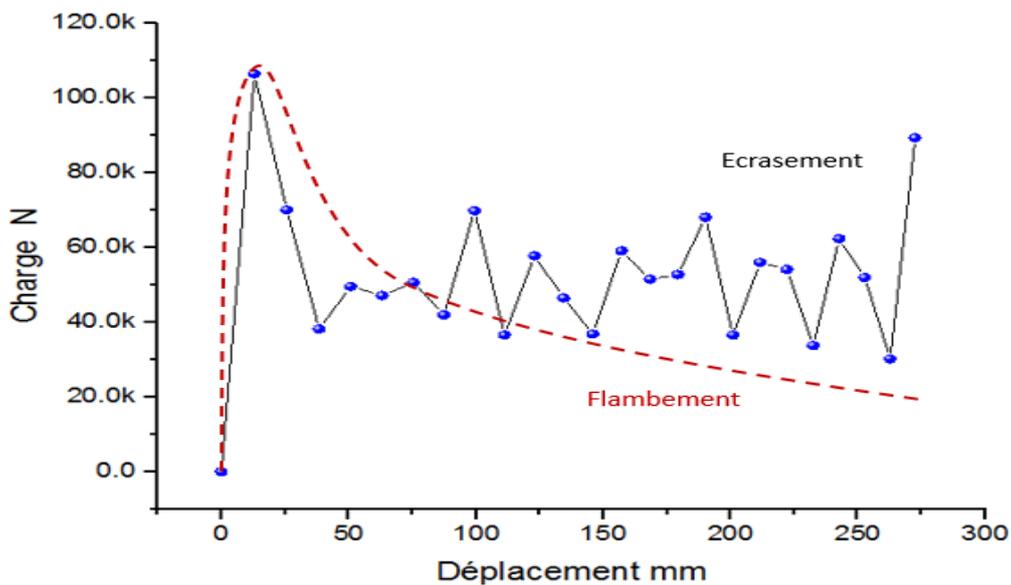


Fig. 1.3 Mode d'écrasement Stable et Instable

1.8 : Généralités sur le code de calcul - ABAQUS

Le logiciel de simulation par éléments finis Abaqus, développé par Dassault Systèmes, est largement utilisé dans divers secteurs industriels pour modéliser et résoudre des problèmes complexes liés à la mécanique des structures, aux fluides, à l'électromagnétisme, etc. Grâce à ses fonctionnalités avancées, Abaqus permet la réalisation de simulations numériques pour étudier les déformations, les contraintes, les vibrations, les écoulements et les phénomènes thermiques. Les utilisateurs peuvent créer des modèles 3D, définir des conditions aux limites et des propriétés matérielles, tandis qu'Abaqus résout numériquement les problèmes physiques grâce à ses algorithmes sophistiqués. En plus des simulations statiques et dynamiques, Abaqus prend en charge les analyses non linéaires et l'optimisation, offrant ainsi un outil puissant aux ingénieurs et chercheurs pour valider virtuellement leurs conceptions et répondre aux critères de performance avant la mise en production réelle.

1.9 Etude bibliographique

Les tubes composites ont de nombreuses applications dans les domaines de l'espace, de l'aéronautique et de la marine [1], principalement en raison de leur capacité à supporter des niveaux élevés de charges de compression axiale et/ou transversale, où la majeure partie de la structure est sollicitée dans un état de membrane [2]. Du point de vue de la conception, l'instabilité locale ou globale due à la pression, aux charges axiales ou radiales, représente souvent la charge limite [3].

Certaines propriétés spécifiques peuvent être davantage exploitées si le fonctionnement est étendu à la plage de flambement postérieur, c'est-à-dire lorsque la structure est capable de supporter une partie de la charge après le flambement. Cependant, la prédiction du flambement dans les structures composites à paroi mince est très complexe et pas encore entièrement comprise, car elle dépend fortement de facteurs tels que la séquence d'empilement [4], l'épaisseur de la paroi, les conditions aux limites, les paramètres géométriques ou les imperfections de fabrication [5]. Des contributions scientifiques sont disponibles dans ce domaine. Par exemple, Tafreshi [6] a développé un modèle numérique pour prédire le flambement et le flambement postérieur des cylindres composites imparfaits soumis à une pression externe et à une compression axiale. White et al. [7] ont réalisé une analyse du flambement postérieur de tubes cylindriques à rigidité variable sous compression axiale par le biais d'analyses linéaires et non linéaires, où cette dernière a mieux prédit le comportement final après le flambement.

Les modèles numériques puissants ont été développés pour partiellement remplacer les essais expérimentaux coûteux [8]. Un outil de calcul robuste basé sur des modèles analytiques et/ou numériques peut prédire la réponse au flambage linéaire ou non linéaire des tubes composites. Dans le cas de l'analyse linéaire, la stabilité d'une structure est déterminée en calculant sa charge critique de flambage, c'est-à-dire une perturbation de l'état de contrainte qui ne perturbe pas l'équilibre entre les forces externes et internes. Cette charge critique est généralement une valeur propre (Eigenvalue), et le mode de flambage est déterminé par les vecteurs propres correspondants. En revanche, l'analyse non linéaire peut prendre en compte le post-flambage, complétant ainsi l'analyse linéaire [9].

Une recherche théorique sur le problème de flambage des tubes composites avec différentes conditions aux limites est présentée par [10]. Différents types de chargement de compression, et de torsion interne, externe où toute combinaison de ceux-ci peut être appliquée. La méthode développée dans ce travail pour trouver les charges de flambage donne une équation exacte qui

est plus simple que la méthode exacte adoptée par d'autres chercheurs. Pour vérifier la validité de l'analyse présente, les résultats sont comparés avec certains résultats théoriques et expérimentaux disponibles.

La recherche [11] a exploré la distinction entre les modes d'échec des tubes cylindriques sous compression axiale, notamment le flambage, l'effondrement et la rupture matérielle. L'étude s'est penchée sur la réaction de tubes en carbone/époxy enroulé de filaments face à cette compression. Trois méthodes ont été examinées : le flambage linéaire, le flambage non linéaire, et la modélisation des dommages progressifs (PDM). Des analyses analytiques, numériques et expérimentales ont été menées pour soutenir cette étude. Il a été constaté que les tubes plus fins subissent un flambage suivi d'une phase post flambage, alors que les tubes plus épais présentent une rupture matérielle due à la compression transversale et aux contraintes de cisaillement. Les modèles analytiques et numériques linéaires ont précisément prédit la charge critique de flambage pour les tubes $[\pm\alpha]$, tandis que le modèle de flambage non linéaire a correctement estimé le déplacement axial tout au long du processus de chargement.

Une étude expérimentale faite par [12] penche sur le flambage de tubes en CFRP avec diverses orientations de plis. Des échantillons avec des séquences d'empilement spécifiques ($[0_4/\pm\theta]$) ont été testés sous compression axiale, renforcés aux extrémités et soutenus par des articulations. Les résultats ont permis d'ajuster les courbes de colonnes pour chaque configuration selon la formule de Perry-Robertson, en vue de futures applications des tubes CFRP. Les tests révèlent une grande variabilité des données, surtout pour les tubes courts sous forte contrainte, propices aux défauts. Une stratégie de conception sécuritaire est suggérée, incluant un facteur de réduction supplémentaire basé sur l'analyse statistique pour les rapports de minceur inférieurs à 2.

Une étude récente publiée par [13] présente une méthodologie pour optimiser les cylindres composites avec une disposition axiale variable sous compression axiale pour l'espace de conception adopté, les charges et les conditions limites, en utilisant un concept d'optimisation novateur basé sur les caractéristiques de fabrication du processus de Placement de Fibres Sur Mesure (TFP). Ensuite, une analyse post-flambage est réalisée afin d'évaluer pour la première fois la sensibilité aux imperfections des cylindres. L'approche actuelle optimise localement à la fois l'épaisseur et l'angle des fibres de chaque élément fini (EF), où l'accumulation d'épaisseur est atteinte par un chevauchement lisse des torons, une caractéristique typique du processus TFP. Les cylindres optimisés ont des charges de flambage linéaire significativement plus élevées que les dispositions initiales correspondantes et sont moins sensibles aux imperfections géométriques initiales affines. Le travail a conclu que l'optimisation du

comportement au flambage linéaire des coques à axe variable (VA) montre à la fois le potentiel d'utilisation des configurations VA pour exploiter leur capacité d'adaptation et les capacités du cadre d'optimisation actuel pour améliorer et optimiser le comportement des structures VA. Un modèle d'éléments finis est présenté par [14] pour l'analyse géométrique non linéaire des structures en coque composite. Il adopte une formulation en couches de l'élément de coque multiples. Le matériau est supposé avoir un comportement orthotrope. Les équations d'équilibre incrémentielles non linéaires sont établies en utilisant une formulation de déplacement Lagrangien total de la méthode des éléments finis et la solution est réalisée en utilisant la méthode itérative/incrémentale de Newton-Raphson ainsi qu'une formulation sphérique des méthodes de longueur d'arc. Le comportement au flambage des coques composites est analysé en fonction de l'orientation du matériau et de l'empilement des stratifiés. L'article discute aussi l'implémentation de l'élément de coque Marguerre pour l'analyse non linéaire des coques sandwich stratifiées, en utilisant des méthodes telles que Ramm-Crisfield pour tracer le chemin complet de charge-déplacement non linéaire. Les tests sur des coques stratifiées isotropes et orthotropes ont révélé que les couches orientées à 0° augmentent la charge de flambage, tandis que l'absence de ces couches rend la structure plus flexible, surtout avec les couches à $[90]$. Les résultats sont prometteurs, bien que limités aux coques peu profondes.

Une solution d'élasticité tridimensionnelle a été présentée par [15] pour le flambage de stratifiés composites simplement supportés composés d'un nombre arbitraire de couches orthotropes. Comme les solutions sont exactes dans le cadre des hypothèses de l'élasticité linéaire, elles sont exemptes des hypothèses simplificatrices imposées par les théories bidimensionnelles. Par conséquent, les auteurs ont conclu que la technique de solution tridimensionnelle développée fournit un cadre permettant de faire des comparaisons avec les théories classiques et autres bidimensionnelles. Et offre également un aperçu des hypothèses nécessaires à la formulation de théories plus générales pour les stratifiés composites. Et ont affirmés que la variation des rigidités des stratifiés, dans la direction de chargement et la direction transversale, affecte la solution de la théorie raffinée du troisième ordre. Cela conduit à une surestimation ou une sous-estimation légère des charges critiques, par rapport à la solution exacte d'élasticité.

La solution relative à des charges de flambage des coques et panneaux cylindriques orthotropes minces et moyennement épais soumis à une compression axiale et une pression normale est discuté par [16] par des hypothèses simplificatrices de la théorie des coques peu profondes, et prend en compte la flexibilité par rapport aux charges de cisaillement transversal, qui est supposée être relativement élevée avec les structures composites stratifiées. L'analyse est faite

par un programme informatique BOSCAP (Buckling of Orthotropic Shear-flexible Cylinders And Panels) est développé sur la base de la formulation mentionnée ci-dessus, qui est très rapide et facile à utiliser pendant les essais de conception ou dans l'optimisation automatisée. Une série d'exemples numériques est présentée pour démontrer les effets."

Les charges de flambage des cylindres stratifiés peuvent fortement dépendre de la position des couches orientées différemment à l'intérieur de la coque. Ce problème est traité par [17] en utilisant deux cylindres orthotropes stratifiés avec différentes séquences d'empilement opposées des couches de stratifié. Les cylindres ont été minutieusement testés dans le cadre d'un projet BRITE EURAM. Des méthodes analytiques et semi-analytiques ont été utilisées par les auteurs pour prédire les charges. Le comportement au flambage des cylindres composites en fibres comprimés axialement est influencé de l'orientation des fibres, et de la séquence d'empilement à l'intérieur du stratifié. Deux exemples sont donnés pour lesquels inverser la séquence d'empilement change considérablement la charge de flambage. Pour l'un d'eux, des résultats expérimentaux sont disponibles qui confirment les prédictions obtenues par la théorie classique du flambage.

Dans leur recherche, Ozgur et ses collègues [18] ont abordé la conception optimale de structures composites bidimensionnelles, ciblant l'augmentation de la capacité de charge de flambage. Ils ont innové en utilisant l'orientation des fibres de chaque couche comme variable de conception clé. Grâce à un algorithme de recuit simulé direct, ils ont pu explorer un large éventail d'angles de fibres, ce qui a permis d'élargir significativement l'espace de conception. Leur approche a mené au développement d'un code informatique efficace, capable de générer des solutions optimales pour divers cas de charge. Les résultats ont démontré que l'algorithme était non seulement capable de localiser tous les designs optimaux globaux, mais aussi de découvrir des conceptions avec une capacité de charge de flambage supérieure, tout en conservant la même épaisseur de matériau. Cette avancée représente une étape significative dans la conception de matériaux composites plus performants et plus surs.

Les charges critiques de flambage pour différentes densités de noyau et matériaux de panneaux en nid d'abeille ont été étudiées expérimentalement et numériquement par [19]. Les spécimens soumis à une charge latérale ont montré trois. L'effet de la densité du noyau et de ses matériaux sur le comportement et les dommages a été mis en évidence. D'après l'expérience, il est clair que la charge de flambage des spécimens augmente avec l'augmentation de la densité du noyau. En termes de rigidité et de charge à la rupture, le panneau sandwich en nid d'abeille présentait de meilleures caractéristiques mécaniques que ses composants. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus ont été comparés entre eux. En conclusion, une bonne corrélation entre la

théorie et l'expérience a été trouvée. Les charges critiques de flambage pour différentes densités de noyau et matériaux de panneaux composites en nid d'abeille sont étudiées expérimentalement et numériquement par [20] et en conclut l'effet significatif de la densité du noyau et du matériau sur les charges critiques de flambage des panneaux composites en nid d'abeille. Les résultats soulignent l'importance de ces paramètres dans la conception et l'analyse de ces structures pour des applications critiques.

1.10 Problématique

Le flambement linéaire est un phénomène complexe qui se produit lorsque des structures élancées, telles que des tubes composites, sont soumises à des charges de compression. Ce phénomène peut entraîner une instabilité mécanique significative, menant potentiellement à la défaillance de la structure. La problématique centrale est de comprendre comment les propriétés des matériaux composites influencent le comportement au flambement et comment prévoir de manière précise l'apparition de ce phénomène.

Comment prédire et prévenir le flambement des tubes composites afin de concevoir des structures plus sûres et plus performantes ?

Défis :

- Comprendre l'impact des propriétés des matériaux composites sur le comportement au flambement.
- Développer des modèles et des méthodes de calcul fiables pour prédire l'apparition du flambement.
- Concevoir des structures élancées en tubes composites qui soient résistantes au flambement tout en exploitant les avantages de ces matériaux.

Enjeux :

- Améliorer la sécurité et la durabilité des structures élancées.
- Optimiser l'utilisation des matériaux composites dans une multitude d'applications.
- Améliorer les méthodes de calcul et les raffiner les modèles numériques

1.11 Questions de recherche et Objectifs :

1. Comment les caractéristiques géométriques et les propriétés des matériaux composites affectent-elles le seuil de flambement ?
2. Quels sont les modèles théoriques et numériques les plus adaptés pour prédire le flambement linéaire dans les tubes composites ?
3. Comment l'introduction des séquences d'empilement et de carbone ou d'autres renforcements peut-elle améliorer la résistance au flambement des composites ?

L'objectif principal est de développer une compréhension approfondie du flambement linéaire dans les tubes composites afin d'améliorer leur conception et leur utilisation dans diverses applications industrielles. Cela inclut :

- Établir une relation entre les propriétés des matériaux et le comportement en flambement.
- Valider des modèles théoriques et numériques pour la prédiction du flambement.

1.12 Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la réalisation de ce projet s'organise autour de cinq chapitres principaux, dont les trois premiers ont un caractère bibliographique et les deux derniers décrivent les recherches effectuées.

Le premier chapitre de la thèse introduit de manière générale le phénomène de flambement, aborde les matériaux composites et présente une revue de la littérature actuelle.

Dans **le deuxième chapitre**, une introduction est donnée à la formulation analytique ainsi qu'aux équations de la théorie de l'élasticité des coques courbées pour résoudre le problème de flambement.

Le troisième chapitre se concentre sur une analyse approfondie de l'impact des paramètres de conception sur la résistance au flambage des tubes soumis à une compression, en mettant en avant l'influence de la géométrie de la section, de l'élanement et des dimensions de la section.

Le quatrième chapitre examine l'effet de la séquence d'empilement sur la charge critique de flambement dans les composites en verre, mettant en lumière les différentes séquences d'empilement.

Le cinquième chapitre analyse l'effet du matériau sur le comportement au flambement des sections tubulaires en utilisant trois matériaux composites et deux alliages. Il inclut une discussion des résultats suivie d'une conclusion partielle et générale sur l'ensemble des travaux réalisés au cours de ce mémoire.

Enfin, Ce travail se concentre sur l'effet de la forme de la section et du type de matériau (conventionnel ou composite) sur le comportement de différents types de tubes soumis à la compression axiale. Nous examinerons d'abord les conséquences de la géométrie et la forme de la section du tube sur l'évolution des charges critiques de flambement. Ensuite, nous présenterons l'effet de la séquence d'empilement et du type de matériau composite sur le flambage. L'analyse des charges critiques est menée à l'aide du calcul numérique, en utilisant l'élément S4R du code Abaqus, et validée par une analyse analytique présentée dans la littérature scientifique.

CHAPITRE-2

Formulation analytique du phénomène de flambement des structures en coques.

La mécanique des structures a pour but de rechercher les meilleures formes et dimensions à donner aux éléments d'une construction, pour lui permettre de résister aux actions qui la sollicitent d'une manière aussi économique que possible. Les structures minces sont pour cela utilisées largement, au vu de leur excellente capacité à supporter et transmettre les sollicitations, couplée à une masse réduite.

La coque cylindrique est un type de structure mince très employé, et dans de nombreux secteurs. On la retrouve ainsi sous forme de conserve dans l'agro-alimentaire, de fuselage d'avion dans l'aéronautique, de silo de stockage dans le génie civil, de réservoir à carburant dans le spatial... Cependant, la faible épaisseur de ces structures les rend sensibles à des phénomènes d'instabilité structurelle, ou flambage. Une bonne compréhension de ces phénomènes est primordiale afin d'éviter un mauvais dimensionnement, c'est pourquoi le flambage de coques minces a été largement étudié depuis le début du XXème siècle. Néanmoins, les méthodes de dimensionnement des coques minces peuvent encore être grandement améliorées, grâce à l'évolution des outils numériques et des méthodes expérimentales permettant de mieux comprendre la phénoménologie du flambage et d'élargir le champ d'exploration.

2.1 Le flambage des structures :

2.1.1 Définitions

Le flambage est une déformation soudaine et catastrophique d'une structure soumise à une charge. Il affecte principalement les structures élancées et se caractérise par une augmentation rapide des déformations lorsque la charge est légèrement augmentée. Le flambage peut entraîner une perte de rigidité ou de capacité portante de la structure, parfois accompagnée d'une déformation plastique. La charge minimale nécessaire pour déclencher le flambage est appelée charge critique.

Le flambage des coques cylindriques soumises aux charges axiales est un phénomène de déformation où la coque subit une déformation élastique ou plastique sous l'effet d'une charge appliquée dans le sens de l'axe du cylindre.

Lorsque la coque subit une charge axiale, elle peut se déformer de manière instable en se courbant latéralement. Cette déformation peut entraîner des effets néfastes sur la structure si elle n'est pas correctement calculée et prise en compte dans la conception.

Pour calculer le flambage d'une coque cylindrique, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres tels que la rigidité de la coque, la charge appliquée, la longueur de la coque et les conditions aux limites de la structure. Il existe différentes méthodes pour calculer le flambage d'une coque cylindrique, notamment la méthode de l'analyse de flambage élastique et la méthode de l'analyse de flambage plastique. Ces méthodes permettent de déterminer la charge critique à partir de laquelle la coque risque de flamber. Il est important de tenir compte de la résistance du matériau de la coque, de sa géométrie et de ses conditions de chargement pour évaluer correctement le risque de flambage et prendre les mesures nécessaires pour renforcer la structure si besoin.

Le flambage des coques cylindriques soumises aux charges axiales est un phénomène courant dans les structures. Il est essentiel de bien comprendre et calculer ce phénomène afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des structures en cas de charges importantes.

2.1.2 Types de flambage :

- **Flambage par bifurcation :** La structure suit d'abord un chemin d'équilibre stable (branche fondamentale), puis devient instable au-delà d'un point de bifurcation. Elle emprunte alors une branche post-critique, généralement instable (coque sous compression axiale), mais parfois stable (plaque rectangulaire sous compression longitudinale).
- **Flambage par point limite :** La structure suit un chemin d'équilibre unique (branche unique) qui devient instable au point limite. La structure s'effondre brutalement sans possibilité de déformation plastique.

En résumé :

- **Définition du flambage :** Déformation soudaine et catastrophique d'une structure sous charge.
- **Caractéristiques du flambage :** Affecte les structures élancées, augmentation rapide des déformations, perte de rigidité ou de capacité portante.
- **Charge critique :** Charge minimale nécessaire pour déclencher le flambage.
- **Types de flambage :** Flambage par bifurcation et flambage par point limite.
- **Chemins d'équilibre :** Branche fondamentale (stable avant bifurcation), branche post-critique (instable sauf cas particuliers), branche unique (flambage par point limite).

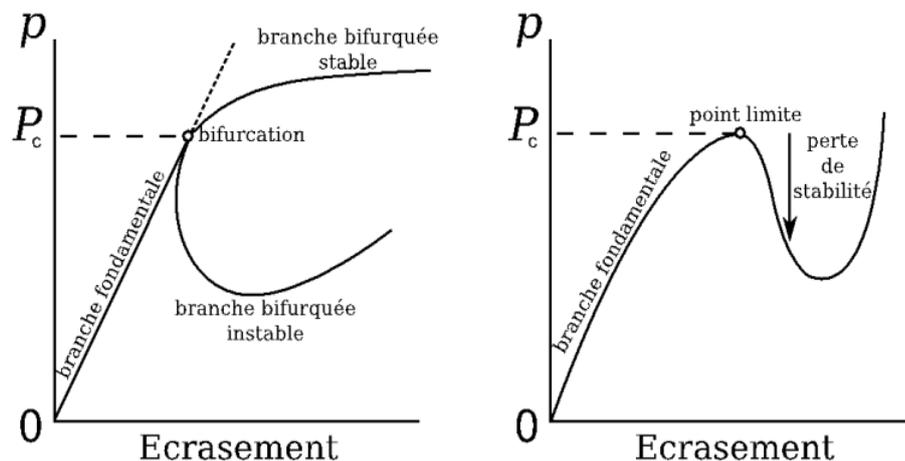


Figure 2.1 Types d'instabilité

2.2 : Analyse Mécanique des Coques Cylindriques de Faible Épaisseur

La mécanique des structures vise à optimiser la conception des structures en termes de forme, de dimensions et de résistance aux sollicitations. Les structures minces, comme les coques cylindriques, sont largement utilisées pour leur capacité à supporter des charges importantes tout en restant légères.

Un exemple de structure mince est la coque cylindrique, utilisée dans des applications telles que les conserves, les fuselages d'avion, les silos et les réservoirs à carburant. Cependant, les structures minces sont sensibles au flambage, ce qui souligne l'importance de bien comprendre ce phénomène pour éviter un mauvais dimensionnement des structures. Il est possible d'améliorer les méthodes de dimensionnement grâce aux progrès des outils numériques et des

méthodes expérimentales, ce qui permet une meilleure compréhension du flambage et élargit le champ d'application des coques minces, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de sécurité, de fiabilité et d'efficacité des structures.

2.2.1 Théorie des coques minces :

Définition d'une coque mince :

Une coque mince peut être définie comme une structure tridimensionnelle dont l'épaisseur t est négligeable par rapport à ses dimensions caractéristiques. Cette propriété permet de simplifier considérablement l'analyse de son comportement mécanique.

Théorie des coques :

La théorie des coques exploite la finesse de la structure pour ramener le problème de déformation tridimensionnel à un problème bidimensionnel. En effet, il suffit de déterminer le champ de déplacement de la surface moyenne de la coque pour décrire correctement son comportement.

2.2.2 Développement de la théorie des coques :

De nombreuses théories des coques ont vu le jour depuis la fin du XIXe siècle. Love [26] fut le premier à proposer une théorie pertinente dans ce domaine. Par la suite, Koiter [24], Flugge [22, 23] et Sanders [27] ont développé des théories similaires, qui se distinguent par les termes du champ de déplacement considérés pour le calcul des déformations et les termes du tenseur des contraintes pris en compte.

2.2.2.1 Théorie de Donnell pour les coques cylindriques minces :

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéresserons spécifiquement à la théorie de Donnell [21], qui s'applique aux coques cylindriques minces. Cette théorie présente un intérêt particulier pour notre étude en raison de la géométrie des structures analysées.

- **Clarification de la définition d'une coque mince :** L'idée d'une épaisseur négligeable par rapport aux dimensions caractéristiques est mieux explicitée.

- **Mise en avant du principe de la théorie des coques** : La simplification du problème tridimensionnel en un problème bidimensionnel est clairement énoncée.
- **Présentation chronologique des développements** : L'historique des différentes théories des coques est présenté de manière chronologique, avec les contributions majeures de Love, Koiter, Flügge et Sanders.
- **Mise en exergue de la théorie de Donnell** : La pertinence de la théorie de Donnell pour le travail en cours est clairement soulignée.

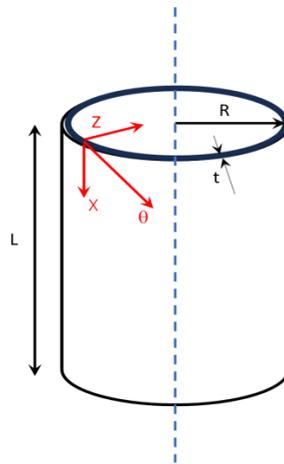


Figure 2.2 Coque cylindrique mince

2.2.2.2 Equations non-linéaires d'équilibre de Donnell

Considérons une coque cylindrique mince de longueur L , épaisseur t et rayon R , avec $t \ll R$. Le champ de déplacement est noté $\{u,v,w\}$, respectivement au système de coordonnées $\{x,\theta,z\}$ défini sur la Figure 2.2.

$$\begin{aligned}
N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \left(1 + \frac{z}{R}\right) dz & N_{x\theta} &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{x\theta} \left(1 + \frac{z}{R}\right) dz \\
N_\theta &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta dz & N_{\theta x} &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\theta x} dz \\
Q_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xz} \left(1 + \frac{z}{R}\right) dz & Q_\theta &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\theta z} dz \\
M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \left(1 + \frac{z}{R}\right) z dz & M_{x\theta} &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{x\theta} \left(1 + \frac{z}{R}\right) z dz \\
M_\theta &= \int_{-t/2}^{t/2} z \sigma_\theta dz & M_{\theta x} &= \int_{-t/2}^{t/2} z \sigma_{\theta x} dz
\end{aligned} \tag{1}$$

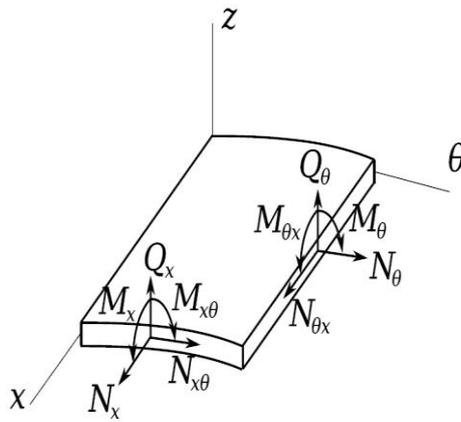


Figure 2.3 Elément de coque cylindrique

Pour des cylindres suffisamment peu profonds le terme Q_θ dans les équations d'équilibre des forces dans la direction circonférentielle.

Les équations de Donnell. La somme des moments dans les directions x et θ donne :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_\theta}{\partial x} - Q_x &= 0 \\
\frac{\partial M_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - Q_\theta &= 0
\end{aligned} \tag{2}$$

Stabilité d'une coque cylindrique mince sous compression axiale

Considérons un cylindre supporté simplement à ses extrémités et soumis à un chargement uniforme de compression axiale P . Les efforts précritiques dans la coque sont donc donnés par

$$N_{x0} = -\frac{P}{2\pi R} \tag{3}$$

Flambage axisymétrique

On considère que les déformations pré-critiques peuvent être déterminées avec suffisamment de précision par les équations linéaires de membrane (on néglige les phénomènes de flexion apparaissant près des conditions aux limites). Un mode de flambage axisymétrique (voir Figure 1.16) se traduit par :

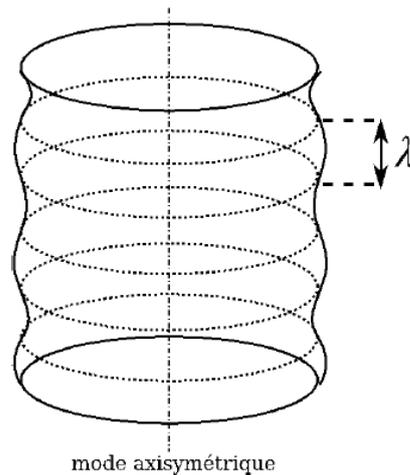


Figure 2.4 Mode Axisymétrique

Figure 2.4 Mode de flambage axisymétrique d'une coque mince sous compression
En utilisant les équations Donnel exprimées en fonction du champ de déplacement (u, v, w) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{\nu}{R} \frac{dw}{dx} = 0 \\ D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{C}{R^2} \left(w + \nu R \frac{du}{dx} \right) + \frac{P}{2\pi R} \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad [4]$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{et} \quad C = \frac{Et}{1-\nu^2}$$

Les solutions recherchées doivent satisfaire les conditions aux limites, ce qui nous amène à considérer des fonctions de la forme :

$$w = A \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \quad \text{et} \quad u = B \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \quad [5]$$

L'introduction de ces déplacements dans les équations Donnel nous amène à :

$$\sigma = \frac{P}{2\pi Rt} = \frac{D}{t} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + \frac{E}{R^2} \left(\frac{L}{m\pi} \right)^2 \quad [6]$$

On obtient une valeur propre différente pour chaque valeur de m . La contrainte critique correspond à la valeur propre minimale pouvant être obtenue. Pour des cylindres suffisamment longs, on peut minimiser la contrainte par rapport à m :

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{Et}{R} \quad [7]$$

On retrouve ainsi l'expression de la contrainte classique, obtenue au début du siècle par Lorenz [62], Timoshenko [109] et Southwell [103]. La longueur d'onde associée (voir Figure 2.4) est égale à :

$$\lambda = \frac{L}{m} = \frac{2\pi}{[12(1-\nu^2)]^{1/4}} \sqrt{Rt} \quad [8]$$

CHAPITRE 3

Impact des paramètres de conception sur la résistance au flambage des tubes sous compression

Introduction

Le flambage des tubes sous compression est un phénomène important à considérer dans le domaine de l'ingénierie des structures, car il peut entraîner des défaillances catastrophiques. L'influence des caractéristiques de conception sur la résistance au flambage des tubes est donc un sujet de recherche crucial pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures. Dans cette étude, nous examinons comment des facteurs tels que la forme, la géométrie et les propriétés matérielles des tubes peuvent affecter leur capacité à résister au flambage sous compression. Nous explorerons également les différentes méthodes de calcul et de modélisation utilisées pour prédire le comportement en flambage des tubes, afin de fournir des recommandations pratiques pour une conception optimisée et sécurisée.

Dans ce chapitre, nous allons éclaircir les effets des paramètres suivants :

- **La géométrie de la section**
- **Effet de l'élançement**
- **Effet de dimension de la section**

3.1 Effet de la géométrie de la section sur la charge critique de flambement dans les tubes comprimés

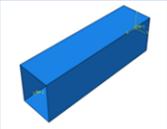
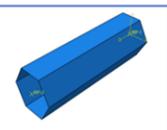
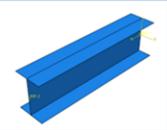
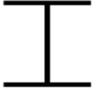
Le comportement en flambement des tubes comprimés, sujet largement étudié en génie civil et en mécanique des structures, est influencé par de nombreux facteurs parmi lesquels la forme de la section joue un rôle primordial. En effet, la forme de la section d'un tube comprimé peut avoir un impact significatif sur sa capacité à résister à la charge de compression et à éviter la déformation due au phénomène de flambement. Dans cette étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'effet de la forme de la section sur le comportement en flambement des tubes comprimés, en analysant les différentes configurations possibles et en mettant en lumière les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles.

3.1.1 Définition et concept

On se propose d'évaluer la charge critique de flambement pour six tubes ayant des sections de formes différentes et soumis à une contrainte de compression simple due à une charge uniformément répartie sur l'épaisseur du tube. Les tubes ont une longueur de 150 mm et une section de 228,5 mm² en aluminium A7075, avec des modules élastiques de $E=70000$ MPa et $\nu=0.3$. Les épaisseurs des tubes sont choisies de manière à égaliser les contraintes de compression dans le tube. Le modèle EF utilisé, ainsi que les conditions aux limites et de chargement, sont ceux décrits dans la partie (Chapitre 3).

3.1.2 : Géométries et formes utilisées

Tableau 3.1. Présentant les différentes formes géométriques testées avec toutes les propriétés géométriques de chaque forme

Forme de tube	caractéristiques Géométriques du tube		
		L=150 mm Rayon R=25mm t= 1.455 mm	Circulaire Carrée Hexagonale Triangulaire Elliptique Profilé en H
		L=150 mm Coté a=38.1 mm t= 1.5 mm	
		L=150 mm a=25.39 mm t= 1.5 mm	
		L=150 mm Coté a=43.38 mm t= 1.75 mm	
		L=150 mm a=35 mm, b=20 mm t= 1.276 mm	
		L=150 mm S= 30 mm ; A=40 mm t= 2.28 mm	

L'Aluminium 7075 est choisi comme le matériau de tests avec $E=70000 \text{ MPa}$, $\nu=0.3$

3.1.3 Paramètres influençant le comportement en flambement

Plusieurs paramètres liés à la forme de la section influencent le comportement en flambement des tubes comprimés, notamment :

- **La géométrie de la section :** La forme de la section transversale, telle que circulaire, rectangulaire, elliptique ou en forme de croix, a un impact significatif sur la résistance au flambement .Les sections circulaires, en raison de leur symétrie et de leur répartition

uniforme des contraintes, présentent généralement une meilleure résistance au flambement que les autres formes.

- **Les dimensions de la section :** Le rapport entre la hauteur et la largeur de la section transversale joue également un rôle important. Les sections élancées, c'est-à-dire avec un rapport hauteur/largeur élevé, sont plus susceptibles de se déformer par flambement que les sections plus courtes et plus trapues.
- **L'épaisseur des parois :** L'épaisseur des parois du tube influence sa rigidité et sa résistance au flambement. Des parois plus épaisses augmentent la capacité du tube à supporter des charges axiales sans se déformer.

3.1.4 Modes de flambement

Les modes de flambement d'un tube comprimé dépendent de sa forme de section et de ses conditions d'appui. Les modes de flambement les plus courants incluent :

- **Flambement Euler :** Ce mode se produit pour les tubes longs et élancés avec des conditions d'appui simples, telles que des articulations à chaque extrémité. Le tube se déforme en forme de "S" sinusoïdale.
- **Flambement local :** Ce mode se produit pour les tubes courts ou avec des conditions d'appui plus rigides. La déformation se concentre sur une zone spécifique du tube.
- **Flambement par torsion :** Ce mode se produit pour les tubes non circulaires, tels que les tubes rectangulaires ou elliptiques. La déformation implique une torsion du tube en plus de la flexion.

3.1.5 Conception de tubes comprimés

Lors de la conception de tubes comprimés, il est essentiel de prendre en compte l'effet de la forme de la section sur le comportement en flambement. Les normes de construction et les codes de conception fournissent des directives pour la sélection de la forme et des dimensions de la section en fonction des charges attendues et des conditions d'utilisation.

3.1.6 Formulation Numérique et Outils de simulation

Les outils de simulation par éléments finis (EF) par le code Abaqus :

Les outils de simulation par éléments finis (EF) se révèlent être des atouts majeurs dans la prédiction du comportement en flambement des tubes comprimés, offrant un niveau de précision remarquable. Le modèle EF développé sur le code Abaqus est composé d'un Tube carré modélisé par 2600 éléments finis de Coques S4R « A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains » avec une épaisseur variable pour assurer une section et une contrainte normale égale pour les différents types de tube.

3.1.7 Résultats et Discussions

La courbe Figure 3.1 et l'histogramme Figure 3.2 illustrent les écarts de résistance entre chaque forme dans chaque mode. On constate que la résistance de la forme circulaire est nettement supérieure à celle des autres formes. Initialement, la forme H présente une résistance plus faible dans les premiers modes (1, 2 et 3) que les formes ovale, hexagonale, triangulaire et carrée. Cependant, dans le mode 4, la résistance de la forme H surpassera celle de l'hexagone jusqu'à égaler celle de la forme ovale au mode 10. L'ordre de classement de la résistance au flambement des différentes formes est le suivant : forme circulaire en première position, suivie de la forme ovale, puis des hexagones, forme H, forme triangulaire, et enfin la forme carrée.

Les résultats des charges critiques pour toutes les variantes formes sont résumés dans le tableau 3.2 et représentés dans le graphique ci-dessus.

Tableau 3.2 : Charges critiques pour les 10 premiers modes pour les 6 types de sections

Modes	Carre	Cercle	HEX	TRIAN	Ellipse	Profil H
1	93,902	5,26E+02	2,06E+02	1,14E+02	2,77E+02	1,86E+02
2	94,562	5,26E+02	2,07E+02	1,15E+02	2,77E+02	1,89E+02
3	1,08E+02	5,28E+02	2,22E+02	1,15E+02	2,78E+02	2,16E+02
4	1,16E+02	5,28E+02	2,26E+02	1,15E+02	2,79E+02	2,31E+02
5	1,24E+02	5,49E+02	2,34E+02	1,33E+02	2,90E+02	2,65E+02
6	1,24E+02	5,49E+02	2,34E+02	1,33E+02	2,91E+02	2,67E+02
7	1,24E+02	5,49E+02	2,35E+02	1,43E+02	2,92E+02	2,76E+02
8	1,24E+02	5,49E+02	2,35E+02	1,43E+02	2,93E+02	2,97E+02
9	1,39E+02	5,57E+02	2,48E+02	1,67E+02	3,09E+02	3,02E+02
10	1,39E+02	5,58E+02	2,50E+02	1,69E+02	3,11E+02	3,10E+02

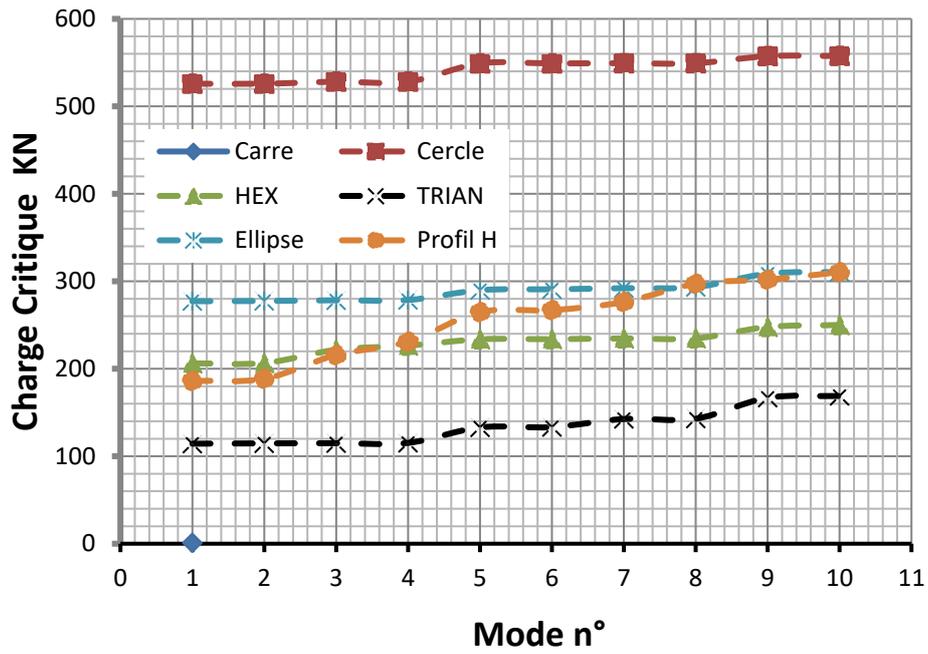


Figure 3.1 Charges critiques pour les 10 premiers modes pour les 6 types de sections

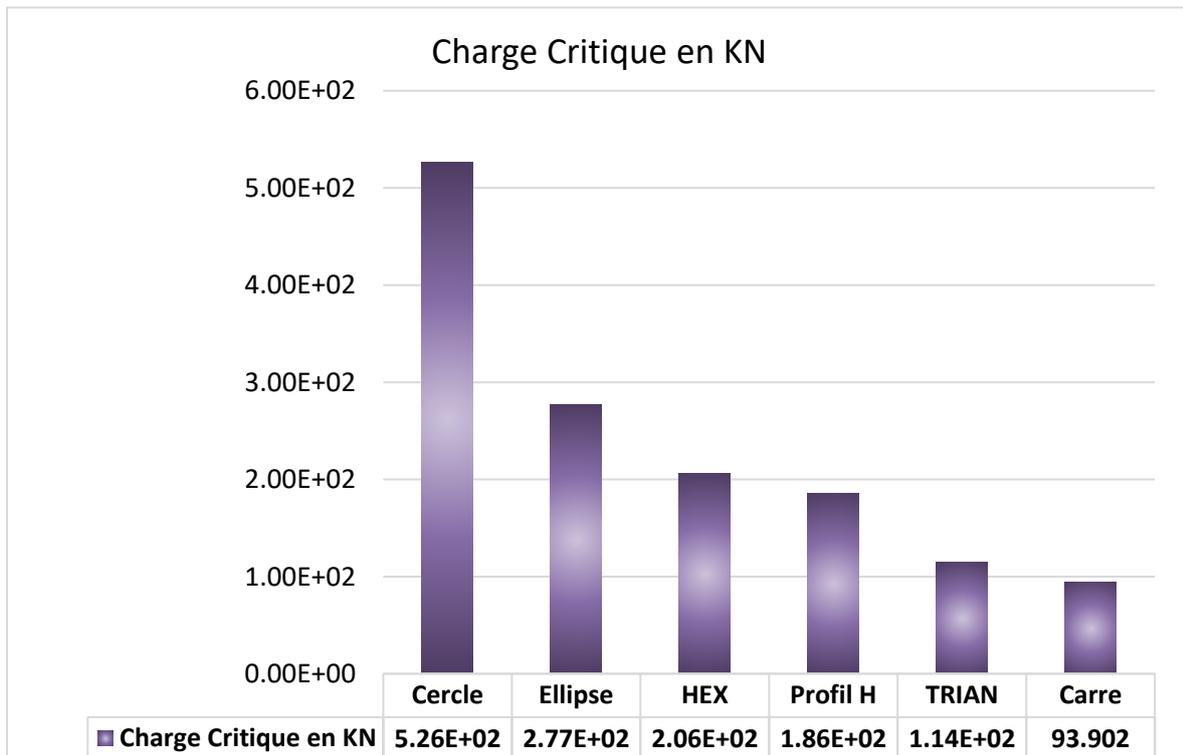


Figure 3.2 Premières Charges critiques pour les 6 types de sections

3.1.8 Récapitulation :

Impact des formes géométriques de la section :

Tableau 3.3 Premières Charges critiques pour les 6 types de sections

Forme	Charge Critique en KN
Cercle	526
Ellipse	277
HEX	206
Profil H	186
TRIAN	114
Carre	93.902

D'après les résultats trouvés on peut tirer en quelques points les remarques et critiques suivantes :

Effet de la forme du tube sur la résistance :

Dans l'étude des structures tubulaires soumises à des forces de compression, la forme géométrique joue un rôle crucial dans la résistance au flambage. La forme circulaire se distingue comme la plus robuste, offrant une résistance supérieure de 47,36% par rapport à la forme elliptique. En comparaison, la forme elliptique présente elle-même une résistance accrue de 25,63% face à la forme hexagonale. Bien que la différence entre les formes hexagonale et en H soit relativement modeste, avec seulement 9,71% de résistance supplémentaire pour la forme en H, cette dernière surpasse nettement la forme carrée avec une résistance 49,52% plus élevée, soulignant l'importance de la sélection de la forme dans la conception des composants structurels

Impact de la géométrie :

La géométrie circulaire présente une répartition plus homogène des contraintes et une résistance supérieure. Les angles vifs caractéristiques de la forme hexagonale ont tendance à concentrer les contraintes, ce qui diminue sa résistance globale. En revanche, les formes en H et carrée démontrent des distributions de contraintes similaires ainsi que des niveaux de résistance comparables.

L'analyse révèle une différence minimale de 9,71% de la charge critique entre les formes hexagonale et en H. Cette constatation suggère que ces deux formes présentent des distributions de contraintes et une résistance structurelle comparables. En raison de cette faible différence de charge critique, il est raisonnable de déduire que les formes hexagonales et en H partagent une répartition semblable des contraintes internes, ce qui implique une capacité équivalente à résister aux forces appliquées. En revanche, une différence significative de 49,52% de résistance est observée entre les formes en H et carrée. Cette constatation met en lumière l'impact important que de légères variations de géométrie peuvent avoir sur la capacité d'une structure à supporter des charges. Il est essentiel de noter que même des modifications subtiles de la forme d'une structure peuvent entraîner des variations notables de sa résistance. Ainsi, il est impératif de tenir compte de la géométrie lors de la conception d'éléments structuraux pour garantir une performance optimale de la structure.

Importance du choix de la forme :

La sélection adéquate de la forme géométrique est essentielle pour optimiser la résistance d'une structure, car le choix de la forme appropriée est crucial pour maximiser sa capacité à résister aux contraintes. Une sélection judicieuse peut améliorer significativement la performance structurelle, impactant directement la capacité d'une structure ou d'un objet à supporter des charges et à remplir sa fonction prévue. Ainsi, la détermination de la forme optimale est un élément fondamental dans la conception réussie d'éléments structurels.

3.1.9 Conclusion

La forme transversale des tubes comprimés a un impact significatif sur leur comportement en cas de flambement, mettant en évidence l'importance de comprendre ce phénomène en ingénierie structurelle. Il est vital pour assurer la sécurité et l'efficacité des structures intégrant ces éléments. Les normes de construction, les codes de conception et les outils de simulation

aident les ingénieurs à choisir la forme et les dimensions appropriées, permettant d'optimiser la performance structurelle tout en répondant aux exigences de chaque projet. Ainsi, la prise en compte de l'influence de la forme transversale sur le flambement des tubes comprimés est essentielle pour concevoir des structures sûres et fiables et permet aux ingénieurs de créer des structures performantes et optimisées.

3.2 Effet de l'élancement sur la charge critique de flambement dans les tubes comprimés

Lorsqu'un tube est soumis à un chargement axial, sa charge critique de flambement est influencée par plusieurs facteurs, dont l'élancement du tube. L'élancement d'un tube est le rapport entre sa longueur et son diamètre. Plus un tube est élancé, plus sa capacité à résister au flambement est réduite.

En effet, un tube plus élancé aura une plus grande tendance à fléchir sous l'effet d'une charge axiale et sera donc plus susceptible de flamber. Cela est dû au fait que la contrainte critique de flambement d'un tube diminue avec son élancement. Par conséquent, un tube très élancé aura une charge critique de flambement plus faible qu'un tube moins élancé de même diamètre et matériau. Ainsi, l'élancement du tube est un facteur important à prendre en compte lors de la conception de structures tubulaires soumises à des charges axiales, car il peut influencer de manière significative la charge critique de flambement et donc la stabilité de la structure.

3.2.1 Charge critique et Elancement

L'élancement est un paramètre des tubes comprimées soumises à une charge axiale. L'élancement se caractérise par une déformation du tube qui se traduit par une torsion autour de son axe longitudinal. Cette déformation peut avoir un impact significatif sur la charge critique de flambement du tube.

Il est important de prendre en compte l'effet de l'élancement sur la charge critique de flambement lors de la conception et de la fabrication de tubes comprimés. Notre étude numérique est menée pour évaluer l'impact de l'élancement sur la résistance des tubes à la compression. Le tableau ci-dessous montre la variation de l'élancement avec la charge critique pour les différents tubes testés.

Données de Problème

L (mm)	Elancement
300	L/R=12
250	L/R=10
200	L/R=8
150	L/R=6
100	L/R=4
50	L/R=2

Tableau 3.4 Longueurs des tubes et les élancements correspondants

Mode N°	Charges Critique Fc 100KN					
	L=300	L=250	L=200	L=150	L=100	L=50
	L/R=12	L/R=10	L/R=8	L/R=6	L/R=4	L/R=2
1	4.74	4.93	5.04	5.26	5.55	5.84
2	4.74	4.93	5.04	5.26	5.55	5.84
3	4.86	4.95	5.07	5.28	5.56	5.86
4	4.86	4.95	5.07	5.28	5.56	5.86
5	4.87	5.22	5.47	5.49	5.64	5.87

Tableau 3.5 : Charge critique avec l'Elancement des cinq premiers modes de flambement

Représentation des 10 premiers modes de flambement

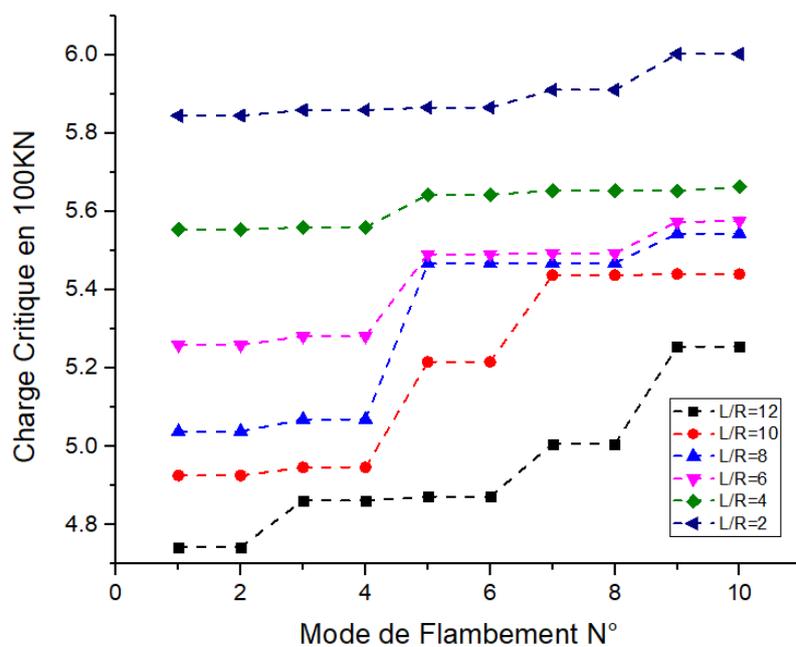


Figure 3.4 Charges critiques avec l'Elancement des dix premiers modes de flambement

Tableau 3.6 : Charges critiques avec l'Élancement des premiers modes de flambement

Longueur L -mm	Élancement	Charge Critique 100KN
300	17.47233547	4.74337
250	14.56027956	4.92578
200	11.64822365	5.03814
150	8.736167734	5.25883
100	5.824111823	5.5543
50	2.912055911	5.84438

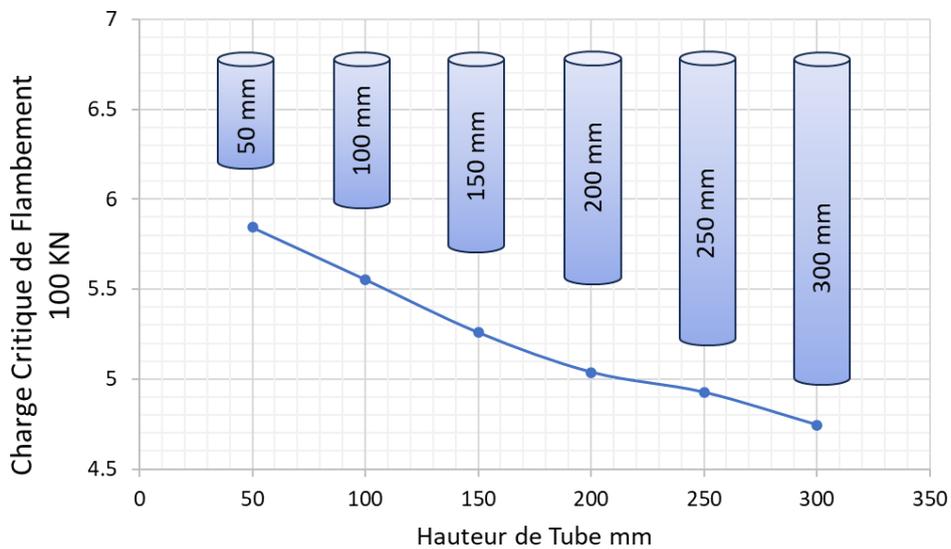


Figure 3.5 Charges critiques avec la hauteur des tubes

La charge critique de flambement d'un tube comprimé est la charge maximale que le tube peut supporter avant de fléchir de manière instable sous l'effet de la compression. Cette charge dépend de plusieurs facteurs, tels que la géométrie du tube, sa rigidité, et la présence d'éventuelles imperfections ou défauts de fabrication. Lorsque l'élancement se produit dans un tube comprimé, il peut influencer la charge critique de flambement de différentes manières.

Tout d'abord, l'élanement peut introduire des contraintes supplémentaires dans le tube, ce qui peut augmenter sa capacité à supporter des charges axiales. En revanche, l'élanement peut également aggraver les imperfections présentes dans le tube, ce qui peut réduire sa résistance au flambement.

L'élanement peut avoir un effet significatif sur la charge critique de flambement dans les tubes comprimés. Il est important de prendre en compte ce phénomène lors de la conception et de la fabrication des tubes afin d'assurer leur résistance et leur fiabilité dans des conditions de compression.

3.3 Effet de diamètre du Tube sur la charge critique d'un tube en Aluminium

3.3.1 Introduction

L'influence du diamètre d'un tube sur sa charge critique est un domaine de recherche intéressant qui suscite un grand intérêt à la croisée de la physique et de l'ingénierie. La charge critique, correspondant à la limite maximale de charge qu'un tube peut soutenir avant de fléchir ou de céder, est soumise à de nombreux paramètres influents tels que le matériau du tube, sa longueur, son épaisseur, et bien entendu, son diamètre. Ces facteurs interagissent de manière complexe pour déterminer la résistance d'un tube et en comprendre les mécanismes constitue un enjeu majeur pour les chercheurs et les professionnels des domaines de la physique et de l'ingénierie.

3.3.2 Exposé du Problème

Tube en alliage d'aluminium AA7075 :

Les caractéristiques mécaniques : $E = 70 \text{ GPa}$: $\nu = 0.3$: $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

Longueur de tube : $L=150 \text{ mm}$ et bi-encasté

Exposé à une charge axiale $N=1$

Les charges critiques sont calculées par le code de calcul Abaqus en utilisant un modèle MEF formé par des éléments de coques S4R

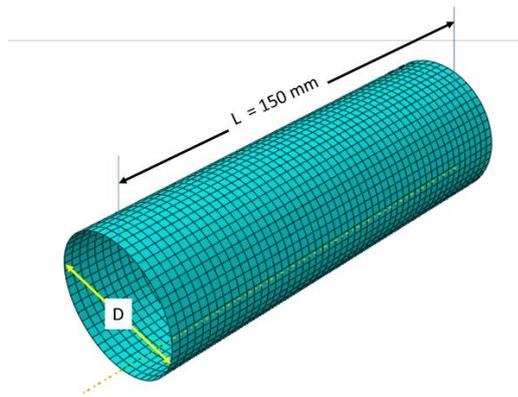


Figure 3.6a : Tube maillé par des éléments coques S4R testés

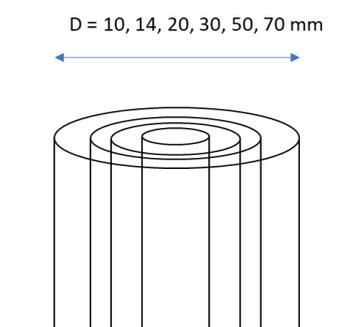


Figure 3.6b : Les diamètres

3.3.3 Résultats et Discussions

Les résultats des tests effectués en flambement linéaire sur le tube sont récapitulés dans le tableau 3.7 suivant :

Tableau 3.7 : Charges critiques avec les diamètres des tubes

Diamètre mm	CH. Critique KN
10	59
14	160
20	387
30	435.5
50	525
70	545

Les charge critiques sont rapportées sur le graphe figure 3..... en fonction du rayons de tube ($R=D/2$)

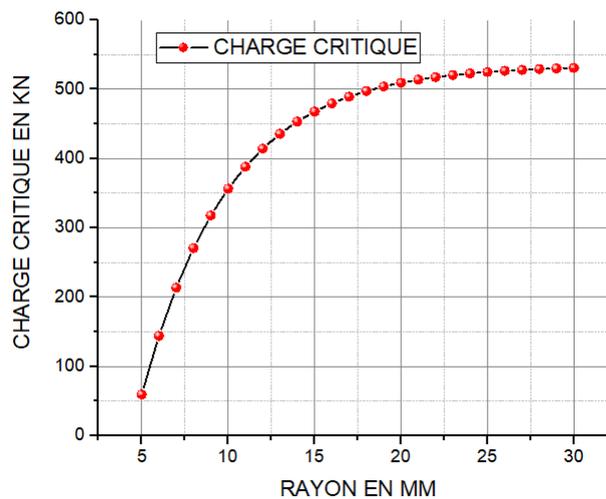


Figure 3.7 : Variation de la charge critique avec le rayon des tubes

3.3.4 Impact du diamètre sur la charge critique d'un tube :

- **Augmentation du diamètre** : Un diamètre plus grand peut répartir la charge sur une surface plus large, ce qui peut augmenter la charge critique du tube. Cependant, cela peut aussi rendre le tube plus disposé à fléchir sous des charges longitudinales.
- **Stabilité** : Un diamètre plus grand peut également améliorer la stabilité du tube contre le flambage, jusqu'à un certain point. Après cela, d'autres facteurs comme l'épaisseur du tube deviennent plus significatifs.

3.3.5 Conclusion,

Le diamètre d'un tube a un effet direct sur sa capacité à supporter des charges sans fléchir ou s'effondrer. C'est un aspect essentiel dans la conception de structures et d'installations où la sécurité et la durabilité sont primordiales. Les concepteurs doivent soigneusement calculer la charge critique en tenant compte du diamètre, parmi d'autres facteurs, pour assurer l'intégrité structurelle de leurs projets

CHAPITRE 4

Effet de la séquence d'empilement sur la charge critique de flambement dans les composites en verre

4.1 : Introduction

L'empilement des couches composites est une technique fondamentale dans la fabrication de structures et de matériaux composites. En superposant et en combinant différents types de couches de matériaux, cette méthode permet de créer des matériaux composites avec des propriétés mécaniques spécifiques et adaptées à des applications variées. L'arrangement stratégique des différentes couches joue un rôle essentiel dans la performance et le comportement des composites, offrant des possibilités d'optimisation et de personnalisation pour répondre aux exigences de chaque projet. Cette technique d'empilement des couches composites est largement utilisée dans divers domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et bien d'autres, ouvrant la voie à des innovations et des avancées significatives dans le domaine des matériaux et des structures composites.

L'empilement croisé de matériaux composites dans la fabrication de tubes comprimés offre des avantages significatifs en termes de résistance au flambement, de rigidité et de performance globale. Cette technique consiste à superposer des couches de matériaux composites avec des orientations de fibres différentes, créant ainsi une structure anisotrope aux propriétés mécaniques optimisées.

4.2 : Types d'empilements croisés

Il existe différents types d'empilements croisés de matériaux composites, chacun avec ses propres avantages et applications :

- **Empilements croisés symétriques** : Les couches de matériaux composites sont disposées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal du tube. Ce type d'empilement offre une bonne résistance au flambement et une rigidité uniforme.
- **Empilements croisés asymétriques** : Les couches de matériaux composites sont disposées de manière asymétrique par rapport à l'axe longitudinal du tube. Ce type d'empilement peut être utilisé pour optimiser la résistance au flambement dans une direction spécifique ou pour introduire une torsion contrôlée dans le tube.

- **Empilements hybrides** : Différents types de matériaux composites, tels que la fibre de carbone, la fibre de verre et les composites métalliques, peuvent être combinés dans des empilements croisés hybrides pour obtenir des propriétés mécaniques uniques.

4.3 Avantages des empilements croisés

L'utilisation d'empilements croisés de matériaux composites dans les tubes comprimés présente plusieurs avantages :

- **Amélioration de la résistance au flambement** : Les empilements croisés permettent d'augmenter la charge critique de flambement du tube, c'est-à-dire la force maximale qu'il peut supporter avant de se déformer latéralement. Cela est dû à la répartition plus uniforme des contraintes et à la capacité accrue du tube à résister aux déformations locales.
- **Augmentation de la rigidité** : Les empilements croisés augmentent la rigidité du tube, ce qui lui permet de mieux supporter des charges axiales sans se déformer excessivement. Cela est particulièrement important pour les applications où la précision dimensionnelle et la stabilité structurelle sont cruciales.
- **Amélioration de la résistance à l'impact** : Les empilements croisés peuvent améliorer la résistance du tube aux impacts et aux charges dynamiques. La structure anisotrope du matériau permet d'absorber l'énergie des impacts de manière plus efficace, réduisant ainsi le risque de dommages et de rupture.
- **Optimisation des propriétés** : L'orientation et l'épaisseur des couches de matériaux composites dans les empilements croisés peuvent être optimisées pour répondre aux exigences spécifiques de l'application. Cela permet de concevoir des tubes comprimés avec des propriétés mécaniques sur mesure, telles que la résistance au flambement, la rigidité et la résistance à l'impact.

4.4 : Exemples d'applications

Les tubes comprimés fabriqués avec des empilements croisés de matériaux composites sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- **Aéronautique et aérospatiale** : Les tubes comprimés en matériaux composites sont utilisés dans les structures d'avions, d'hélicoptères et de satellites en raison de leur légèreté, de leur résistance et de leurs rigidités élevées.

- **Construction** : Les tubes comprimés en matériaux composites sont utilisés dans les structures de bâtiments, les ponts et les tours en raison de leur capacité à supporter des charges importantes tout en restant légers et durables.
- **Industrie pétrolière et gazière** : Les tubes comprimés en matériaux composites sont utilisés dans les forages pétroliers et gaziers en raison de leur résistance à la corrosion et à la pression élevée.

4.5 Données de Probleme

Données Géométriques

Longueur : $L = 150 \text{ mm}$

Section carré : $a \times a = 38.1 \text{ mm} \times 38.1 \text{ mm}$

Epaisseur : $t = 1.544$

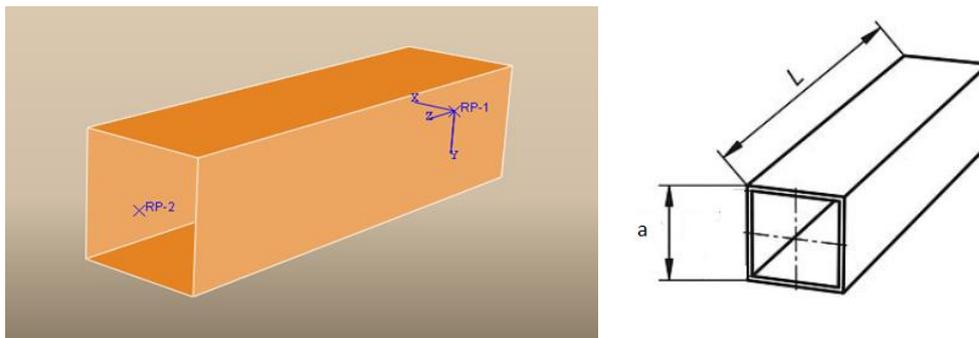


Figure 4.1 : Géométrie du tube d'essai

Données du Matériau

Les composites en verre/époxyde sont des matériaux hautement techniques qui combinent une matrice en fibre de verre avec une résine époxy. Ils sont appréciés pour leur excellente isolation thermique et électrique, leur faible inflammabilité, et leur résistance mécanique élevée. Ces composites sont souvent utilisés dans des applications exigeant une stabilité dimensionnelle

Les caractéristiques mécaniques de pré pège E-GLASS

- fraction volumique de 60%

$E_1=44830$ MPa

$E_2=12410$ MPa

$\nu_{12}= 0.28$

$G_{12} =5517$ MPa

$G_{13}=2800$ MPa

$G_{23}=2800$ MPa

Les séquences d'empilement sont sélectionnées de manière à ce que les plis soient orientés à 0° ou 90° , comme illustré dans la figure ci-dessous

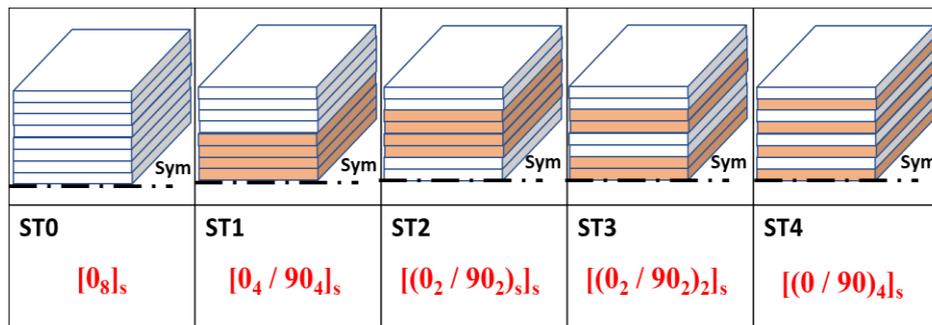
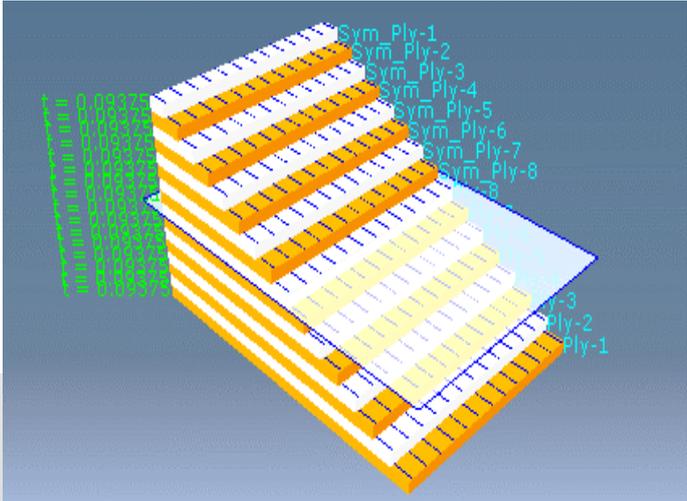


Figure 4.2 les séquences d'empilement testées

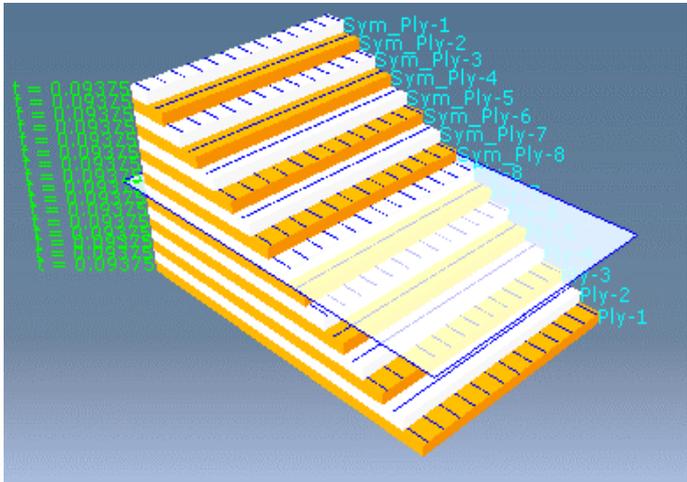
4.6 Modèle Numérique :

Le modèle EF développé sur le code **Abaqus** est composé d'un Tube carré modélisé par 2600 éléments finis de Coques S4R « A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains » avec une épaisseur $t=1.544$ mm modélisé par 16 plis de 0.0965 mm d'épaisseur avec des orientations croisées de 0° ou 90° de moins confinés au plus confiné.

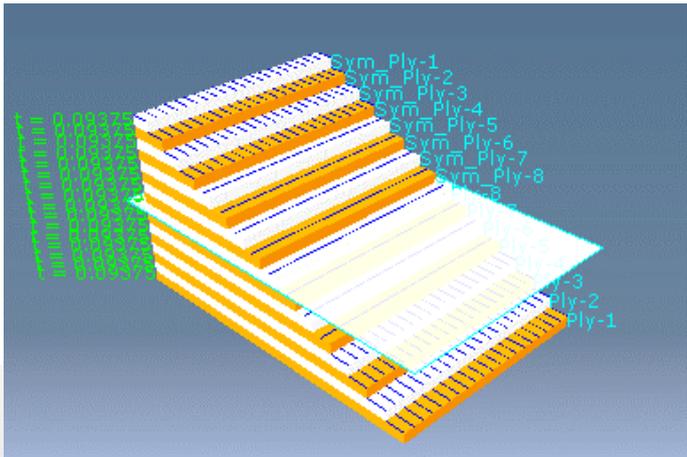
$[0_8]_s$



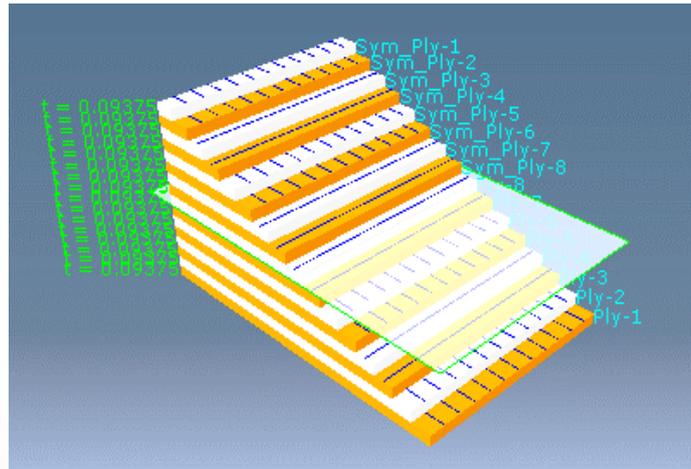
$[(0 / 90)_4]_s$



$[0_4 / 90_4]_s$



$[(0_2 / 90_2)_s]_s$



$[(0_2 / 90_2)_2]_s$

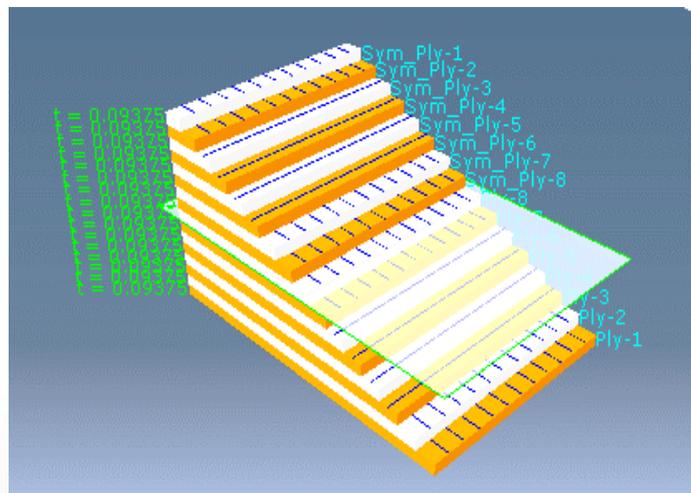


Figure 4.3 Les différentes séquences d'empilement

4.7 Résultats et discussions

Le niveau de confinement des couches dans un stratifié composite a un impact sur ses propriétés mécaniques et son comportement en fonction de l'application spécifique.

Les résultats des charges critiques sont récapitulés dans le tableau 4.1 et représentés dans le l'histogramme ci-dessus.

	ST0	ST1	ST2	ST3	ST4
1	25193	25965	26994	26760	27001
2	25474	26969	27233	27445	27233
3	32853	33719	33240	34305	33218
4	33451	35405	35424	35320	35406
5	33451	35405	36607	36400	36662
6	34216	35602	36607	36400	36662
7	34216	35602	36991	37069	37034
8	37413	36415	36991	37069	37034
9	42595	42724	43353	43482	43355
10	42595	42724	43353	43482	43355

Tableau 4.1 les 10 premières charges critiques pour chaque séquence d'empilement

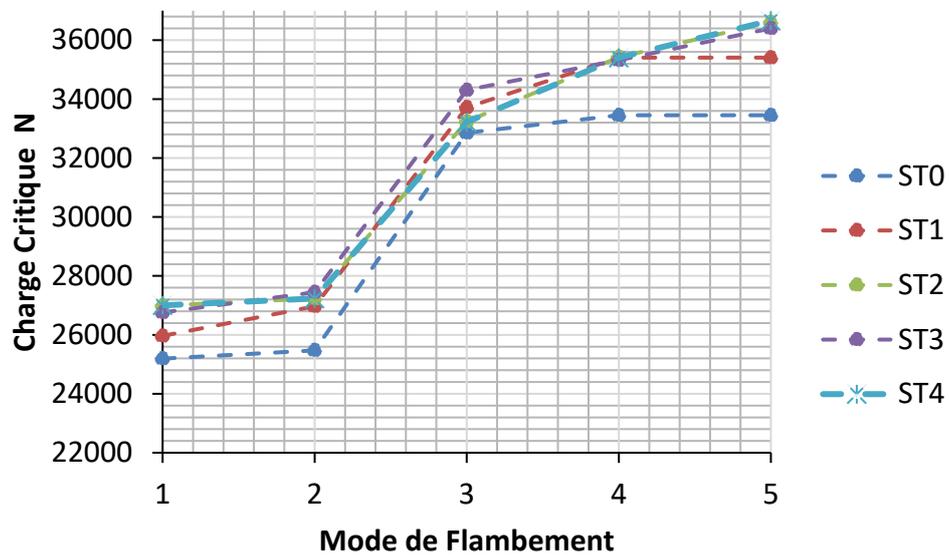


Figure 4.4 Variation des 5 Premières Charges critiques pour les 5 séquences empilements testées

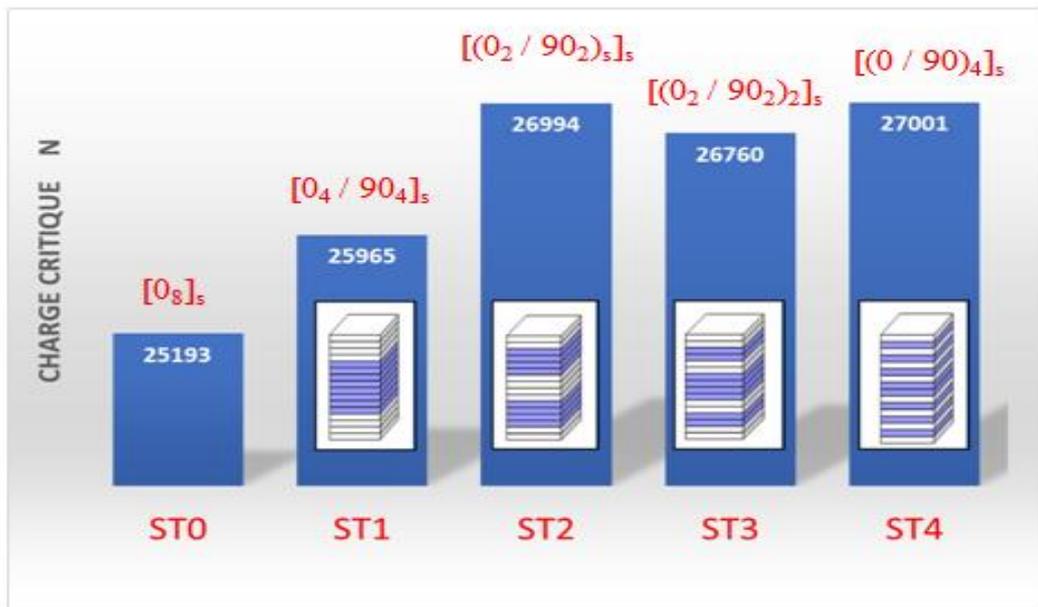


Figure 4.5 : Variation des charges critiques en fonction de la séquence d'empilement

Dans cette représentation graphique, les valeurs de charge critique pour les stratifiés ST0, ST1, ST2, ST3 et ST4 sont mises en évidence. Il est notable que les stratifiés ST2 et ST4 se distinguent comme les plus résistants, capables de supporter une charge critique plus importante. Ensuite, vient le stratifié ST3, suivi du stratifié ST1, et enfin du stratifié ST0.

En fonction de l'utilisation prévue, il est important de choisir le type de stratifié composite le plus adapté. Un stratifié plus confiné sera privilégié pour des applications nécessitant une haute performance et une résistance accrue, tandis qu'un stratifié moins confiné sera plus approprié pour des applications nécessitant une absorption d'énergie plus élevée ou une résistance aux chocs.

La manière dont les couches de matériaux sont arrangées dans un stratifié composite plus ou moins confiné peut également influencer sa durabilité et sa longévité. Un stratifié plus confiné peut offrir une meilleure protection contre l'usure et les dommages, tandis qu'un stratifié moins confiné peut-être plus adapté pour absorber les chocs et dissiper l'énergie.

4.8 Conclusion

La différence entre un stratifié composite plus confiné et moins confiné réside dans la façon dont les couches de matériaux sont arrangées, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques et son comportement en fonction de l'application spécifique. Il est donc essentiel de choisir le type de stratifié le mieux adapté aux exigences de chaque projet pour garantir des résultats optimaux.

La différence entre un stratifié composite plus confiné et moins confiné réside dans la manière dont les couches de matériaux sont agencées. Voici quelques points pour mieux comprendre :

- Stratifié composite plus confiné :

Dans un stratifié plus confiné, les différentes couches de matériaux sont étroitement liées et pressées ensemble, ce qui crée une meilleure adhérence entre elles. Cette adhérence accrue contribue à renforcer la structure globale du matériau. En conséquence, les propriétés mécaniques, telles que la résistance et la rigidité, sont significativement améliorées. Grâce à ces caractéristiques renforcées, ce type de stratifié trouve son utilité dans des applications exigeant une haute performance, où la fiabilité et la durabilité du matériau sont primordiales. Ces stratifiés sont donc privilégiés dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile ou encore la construction navale, où ils contribuent à la sécurité et à l'efficacité des structures.

- Stratifié composite moins confiné :

Dans un stratifié moins confiné, les couches de matériaux sont moins serrées et ont plus d'espace entre elles, ce qui peut entraîner une moindre adhérence entre les couches. Cependant, cette configuration permet aux propriétés mécaniques du matériau d'absorber plus d'énergie. Ce type de stratifié est souvent utilisé dans des applications où la dissipation d'énergie est essentielle, comme dans les absorbeurs de chocs et pour améliorer la résistance aux instabilités. Ainsi, malgré une adhérence réduite entre les couches, les structures composées de stratifiés moins confinés offrent des performances supérieures en termes d'absorption d'énergie et de résistance aux chocs, ce qui les rend particulièrement adaptées pour des applications spécifiques qui nécessitent ces caractéristiques particulières.

Le niveau de confinement des couches dans un stratifié composite a un impact sur ses propriétés mécaniques et son comportement en fonction de l'application spécifique. L'utilisation

d'empilements croisés de matériaux composites dans les tubes comprimés offre des avantages considérables en termes de performance mécanique, d'optimisation des propriétés et d'élargissement du champ d'application. Cette technologie innovante ouvre la voie à la conception de structures plus légères, plus robustes et plus efficaces dans divers domaines d'ingénierie.

CHAPITRE 5

Effet du matériau sur le comportement au flambement des sections tubulaires

5.1 Introduction

Le comportement au flambement des sections tubulaires est un phénomène crucial dans le domaine de l'ingénierie, car il détermine la capacité de ces structures à résister aux charges appliquées sans se déformer ou se rompre de manière catastrophique. Le type de matériau utilisé pour la fabrication des tubes joue un rôle prépondérant dans leur comportement au flambement, influençant plusieurs paramètres clés tels que la charge critique de flambement, le mode de flambement et la capacité d'absorption d'énergie.

5.1.1. Propriétés mécaniques des matériaux :

Les propriétés mécaniques des matériaux tubulaires, telles que le module d'élasticité, la limite d'élasticité et la ductilité, influencent directement leur comportement au flambement.

- **Module d'élasticité :** Le module d'élasticité, ou module de Young, représente la rigidité du matériau. Un matériau avec un module d'élasticité élevé aura une charge critique de flambement plus élevée, ce qui signifie qu'il pourra supporter des charges plus importantes avant de se déformer.
- **Limite d'élasticité :** La limite d'élasticité correspond à la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de subir une déformation plastique irréversible. Un matériau avec une limite d'élasticité élevée aura une plus grande capacité de résistance au flambement avant de se déformer de manière permanente.
- **Ductilité :** La ductilité est la capacité du matériau à se déformer plastiquement avant de se rompre. Un matériau ductile aura une plus grande capacité d'absorption d'énergie après le flambement, ce qui peut retarder ou empêcher la rupture complète de la structure.

5.1.2. Comportement au flambement des matériaux courants :

- **Acier :** L'acier est un matériau couramment utilisé pour les structures tubulaires en raison de sa résistance élevée, de sa rigidité et de sa ductilité. Les tubes en acier présentent généralement un comportement au flambement élastique, ce qui signifie qu'ils se déforment de manière réversible avant de se rompre.

- **Aluminium** : L'aluminium est un matériau léger et résistant à la corrosion, souvent utilisé dans les applications où le poids est un facteur important. Les tubes en aluminium présentent généralement un comportement au flambement élasto-plastique, ce qui signifie qu'ils peuvent subir une certaine déformation plastique avant de se rompre.
- **Composite** : Les matériaux composites, tels que la fibre de carbone et la fibre de verre, offrent une combinaison de haute résistance et de faible poids. Les tubes en composite peuvent présenter un comportement au flambement non linéaire, et leur comportement peut être influencé par l'orientation des fibres et la matrice du matériau.

5.1.3. Facteurs supplémentaires influençant le comportement au flambement :

Outre le type de matériau, d'autres facteurs peuvent influencer le comportement au flambement des sections tubulaires, tels que :

- **Géométrie de la section** : La forme et les dimensions de la section transversale du tube influencent sa résistance au flambement. Les sections circulaires sont généralement plus résistantes au flambement que les sections non circulaires.
- **Conditions d'appui** : Les conditions d'appui des tubes, telles que leur fixation aux extrémités, influencent également leur comportement au flambement. Des conditions d'appui rigides augmentent la charge critique de flambement, tandis que des conditions d'appui plus flexibles peuvent la diminuer.
- **Effets résiduels** : Les contraintes résiduelles, introduites lors de la fabrication ou du soudage des tubes, peuvent affecter leur comportement au flambement en réduisant leur charge critique.

5.2 Structures et Matériaux

Caractéristiques des matériaux utilisés dans l'étude :

5.2.1- Les Alliages

A- L'alliage d'aluminium AA7075 :

Aluminium AA7075 se distingue par sa robustesse et sa résistance exceptionnelle.

Caractéristiques :

- Limite d'élasticité élevée (>500 MPa).
- Solidité comparable à celle de certains aciers.
- Utilisé dans des secteurs exigeants tels que l'aérospatiale et la marine.

Applications :

- Convient aux applications complexes nécessitant une grande résistance.

$E = 70 \text{ GPa}$: $\nu = 0.3$: $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

l'alliage d'aluminium AA7075 est un matériau idéal pour les applications qui requièrent à la fois une grande résistance et une faible masse.

B- Acier A60 – E335

La fiche technique de l'acier A60, également connu sous la désignation européenne E335, révèle les caractéristiques suivantes :

Désignations normalisées :

AFNOR : A60-2

Caractéristiques mécaniques moyennes :

Résistance à la traction = 590/770 N/mm²

Limite d'élasticité = 305/335 N/mm²

Allongement : 6/16%

E = 200GPa : $\nu = 0.26$: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

5.2.2- Matériaux Composites

L'allègement des éléments structuraux est un enjeu important pour le monde des transports qui font face à une réglementation environnementale sévère. Les études d'optimisation économiques sur les absorbeurs de chocs montrent que l'allègement d'environ 18 % est indispensable.

Actuellement, les solutions existantes sont les aciers à très haute limite élastique et l'aluminium. Pour les solutions à venir, les matériaux étudiés sont le magnésium et les matériaux composites. Depuis plusieurs années, l'arrivée des matériaux composites prend une part grandissante pour répondre à cette attente. En effet, les matériaux composites ont de bonnes propriétés mécaniques vis-à-vis de leur densité, une forte résistance à la corrosion et une bonne capacité d'absorption d'énergie. De ce fait, les structures en composites doivent absorber l'énergie de flambement, ce qui implique une réflexion sur la conception des absorbeurs de choc, et les pièces exposées au flambement.

Les composites constitués des fibres (carbone, verre, kevlar) associées à des résines thermodurcissables ou thermoplastiques sont envisageables pour des applications d'absorption d'énergie. Ces matériaux offrent des conditions d'effondrement stable par rapport à l'acier.

Les matériaux composites stratifiés présentent des modes particuliers de ruine en compression qui font apparaître de nombreux endommagements à différentes échelles. Ils peuvent permettre une absorption d'énergie supérieure à celle des métaux pour une masse identique.

Les éléments exposés au flambement et les absorbeurs d'énergie en composites stratifiés sont donc de plus en plus souvent intégrés dans les structures des véhicules de transports. On peut citer comme exemple les caissons amortisseurs sous les châssis d'hélicoptères ou les absorbeurs d'impact latéraux des véhicules de formule I. Cette intégration a été réalisée grâce aux nombreuses recherches.

5.2.2.1 Fibres de carbone : souvent appelées graphite, sont des matériaux composés principalement d'atomes de carbone arrangés en une structure cristalline en feuilles. Ces fibres sont produites à partir de précurseurs tels que le poly nitrile (PAN), la rayonne ou le goudron de houille.

Les fibres de carbone offrent une combinaison unique de propriétés mécaniques exceptionnelles. Elles présentent une résistance à la traction extrêmement élevée pouvant atteindre 7 000 MPa, ce qui les rend plus solides que l'acier tout en étant beaucoup plus légères. Elles ont également un module élastique élevé d'environ 520 GPa, ce qui signifie qu'elles sont très rigides et peuvent supporter des charges importantes sans se déformer.

En plus de leurs excellentes propriétés mécaniques, les fibres de carbone ont également une faible densité, ce qui les rend idéales pour réduire le poids dans des applications. Elles ont également une bonne conductivité électrique et thermique.

Grâce à ces caractéristiques uniques, les fibres de carbone sont largement utilisées comme renfort dans la fabrication des composites avancés. Elles sont utilisées dans l'aérospatiale pour fabriquer des pièces légères mais résistantes telles que les ailes d'avion et les fuselages. Dans l'industrie automobile, elles sont utilisées pour alléger les véhicules tout en maintenant leur rigidité structurale. Les sports nautiques et automobiles font également grand usage des composites renforcés par des fibres de carbone pour améliorer leurs performances.

En outre, ces fibres trouvent également leur utilisation dans d'autres domaines tels que l'électronique haute performance, la construction civile ou encore le secteur médical.



Figure 5.1 : Fibre de Carbone

5.2.2.2 Kevlar : une fibre synthétique, offre d'excellentes propriétés mécaniques en traction, avec une résistance à la traction de 3100 MPa et un module de 70-125 GPa. Toutefois, il n'atteint pas les performances de la fibre de carbone, qui peut atteindre une résistance à la traction de 7000 MPa (fibre à très haute résistance) et un module de 520 GPa (fibre à très haut module).



Figure 5.2 : Fibre de Kevlar

5.2.2.3 Fibres en E-Glass : aussi appelées fibre de verre E, sont les plus largement utilisées dans l'industrie des composites renforcés. Voici quelques points clés à propos de ces fibres

Propriétés : Excellente isolation électrique. Très souples et extrêmement flexibles, résistantes à des températures allant jusqu'à 550° C .

Utilisations : Principalement employées dans la fabrication de planches de surf;

Les fibres en E-Glass sont appréciées pour leur polyvalence, leur durabilité et leur rapport coût-efficacité dans une variété d'applications industrielles.

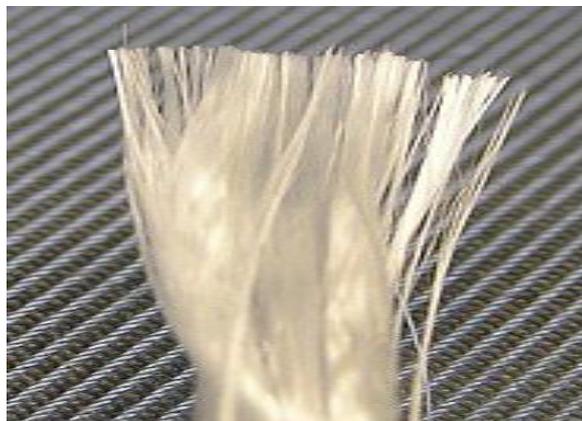


Figure 5.3 : Fibre de Verre

5.2.2.4 Fibres de graphite

Les fibres de carbone et de graphite sont des matériaux extrêmement légers et résistants, largement employés dans une variété d'applications industrielles et technologiques.

Les fibres de graphite sont obtenues par traitement à des températures élevées, atteignant 2 500 à 3 000 °C, pour obtenir une pureté en carbone proche de 99% .



Figure 5.4 : Le Graphite

5.3 Techniques d'investigation

Pour l'analyse l'impact des matériaux sur le flambement des tubes, nous avons sélectionné une section circulaire avec un diamètre de 50 mm. Cette section présente une épaisseur de 1.5 mm et une longueur de 150 mm. Nous avons maintenu les mêmes conditions aux limites que celles appliquées dans les applications décrites dans les chapitres antérieurs, à savoir que la structure est bi-encastée, ce qui signifie qu'elle est fixée à ses deux extrémités, ne permettant aucun mouvement ou rotation.

Dans cette partie, l'étude sera étendue à un alliage d'aluminium 7075 ainsi que l'acier doux A60 est utilisé pour caractériser la réponse au flambement. Trois autres matériaux stratifiés composites ont été utilisés : Carbone, Kevlar et Verre pour des différentes orientations des fibres allant de 0° à 90° dans des stratifiés symétriques de types $[\pm\theta]_s$.

- Composite en fibres de Carbone / Époxyde élaboré des fibres par UM-Graphite
- Composite en fibres de Carbone / Époxyde élaboré par fibres en Kevlar
- Composite en fibres de verre / Époxyde élaboré par fibres en E-Glass

Empilement utilisé : stratifiés symétriques de types [±θ]s.

Les données de matériaux sont représentées par les tableaux 5.1

E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
UM Graphite (GPa)					
289.7	6.207	4.828	0.25	0.25	0.42
KEVLAR 49 (GPa)					
75.86	5.517	2.069	0.34	0.34	0.4712
E-GLASS (GPa)					
44.83	12.41	5.517	0.28	0.28	0.3602
ACIER A60 (GPa)					
210	210	83.33	0.26	0.26	0.26
ALUM 7075 (GPa)					
70	70	26.92	0.3	0.3	0.3

Tableau 5.1 Données de Matériaux

5.4 Résultats et discussions

Les résultats de traitement numérique par le cde Abaqus pour les différents matériaux sont récapitulés dans le tableau 5.2 et présentés dans la courbe en figure 5.5

Angle θ°	UM	KEV	GLAS	Acier	Alum
0	261	120	146	1668	556
20	382	177	164	1668	556
40	365	146	155	1668	556
45	365	144	156	1668	556
50	365	146	155	1668	556
70	382	177	164	1668	556
90	261	120	146	1668	556

Tableau 5.2 Variation des Charges critiques pour les 5 matériaux avec les angles d'orientation des fibres

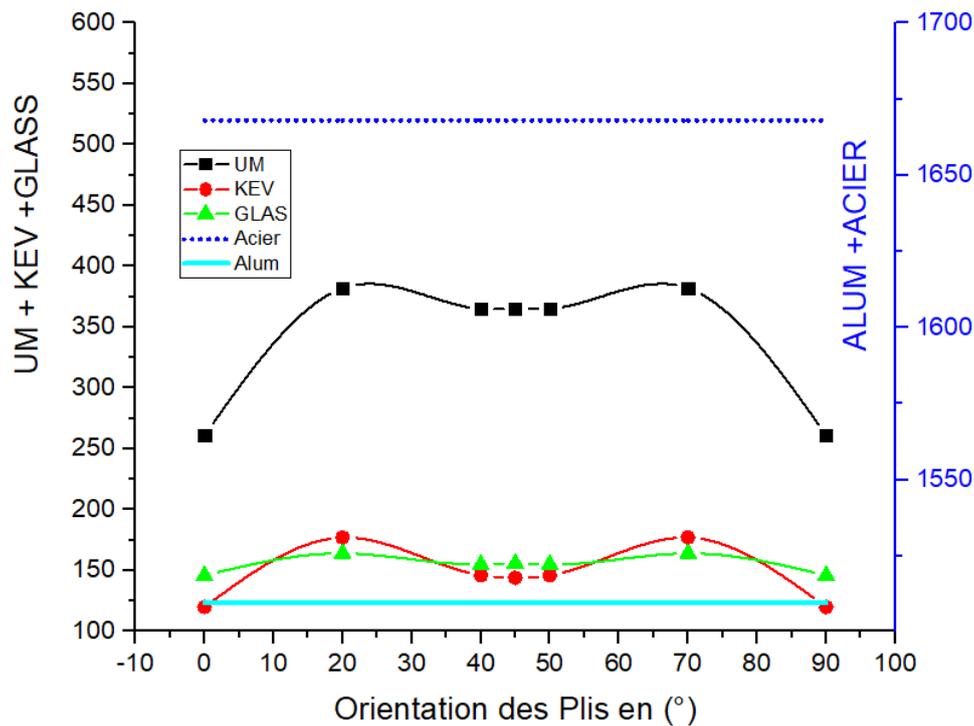


Figure 5.5 Variation des Charges critiques pour les 5 matériaux avec les angles d'orientation des fibres

Les tubes en acier, couramment utilisés dans les structures, présentent généralement un comportement en flambement élastique. Cela signifie qu'ils se déforment de manière réversible avant de subir un flambement soudain. La résistance au flambement des tubes en acier est principalement influencée par leur géométrie (épaisseur, diamètre) et par les propriétés de l'acier utilisé. La charge critique dépasse celle de l'aluminium de 3 fois.

Comportement des tubes en matériaux composites

Les tubes en matériaux composites, tels que les fibres de carbone ou les fibres de verre, présentent un comportement en flambement plus complexe que les tubes en acier. En raison de leur nature anisotrope, les propriétés mécaniques des matériaux composites varient selon la direction de sollicitation. Cela peut conduire à des modes de flambement différents et à une sensibilité accrue aux imperfections géométriques.

Comparés aux métaux (Acier et aluminiums), les stratifiés en fibres de carbone ont montré une capacité bien supérieure que celles des deux autres matériaux (Kevlar, verre) d'environ 35% et bien inférieure aux autres métaux. Ces stratifiés ont des propriétés mécaniques spécifiques comparables à celles des matériaux classiques.

5.5 Conclusion

Les composites en verre et en carbone présentent des différences significatives en ce qui concerne la résistance au flambement des tubes en composites stratifiés. Les composites en carbone offrent une meilleure résistance au flambement en raison de leur rigidité et de leur résistance supérieure par rapport aux composites en verre et en Kevlar. Il est donc primordial de choisir le matériau composite approprié en fonction des exigences de conception et des charges prévues pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures en composites stratifiés.

Pour concevoir des tubes en composites stratifiés résistants au flambement, les ingénieurs doivent prendre en compte divers paramètres tels que la disposition des fibres, l'épaisseur et le nombre de couches, les propriétés des matériaux composites et les conditions de charge prévues. Des analyses approfondies, telles que des simulations numériques et des tests expérimentaux, sont souvent nécessaires pour évaluer la résistance au flambement des tubes en composites stratifiés et optimiser leur conception.

5.6 Amélioration du comportement au flambement des structures tubulaires

Afin d'améliorer le comportement des structures au flambement, il faut jouer sur les points suivants :

- Optimiser ses dimensions géométriques
- Utiliser les nouveaux matériaux composites
- Utiliser des séquences d'empilement appropriées pour une meilleure distribution des contraintes adjacentes
- Utiliser de la mousse pour stabiliser le processus au flambement
- Introduire des imperfections structurales volontaires

Le type de matériau joue un rôle crucial dans le comportement au flambement des sections tubulaires. En comprenant les propriétés mécaniques des différents matériaux et en tenant compte des facteurs supplémentaires qui influencent le flambement, les chercheurs peuvent concevoir des structures tubulaires sûres et efficaces pour une large gamme d'applications.

CONCLUSIONS GENERALE

La forme de la section transversale et le type de matériaux utilisés sont des éléments clés à considérer lors de la conception d'une pièce comprimée sujette au flambement. Une section circulaire est généralement plus efficace pour résister au flambement en raison de la répartition plus uniforme des contraintes, comparativement à une section rectangulaire ou carrée. De plus, les propriétés mécaniques du matériau, telles que la résistance à la compression, influenceront la capacité de la pièce à résister aux charges. Ainsi, l'optimisation de la forme de la section et le choix judicieux des matériaux sont essentiels pour garantir la résistance au flambement et la stabilité de la pièce comprimée.

L'anisotropie, ou la variation des propriétés physiques d'un matériau en fonction de la direction, peut influencer le flambement des tubes en raison de la distribution inégale des contraintes à travers leur section transversale. Les effets de l'anisotropie incluent une répartition inégale des contraintes, une variation de la résistance et la nécessité d'une conception spécifique pour assurer la stabilité face au flambement. Cela implique des considérations complexes lors de la conception des tubes pour garantir leur sécurité et fiabilité sous l'effet d'une force de compression.

Les tubes en carbone/époxy et en verre/époxy sont des composites largement utilisés en raison de leurs propriétés mécaniques élevées et de leur légèreté, mais ils réagissent différemment au flambement en fonction de facteurs tels que les caractéristiques des matériaux constitutifs. Les tubes en carbone/époxy offrent généralement une résistance à la compression supérieure, un module d'élasticité plus élevé et un coût plus élevé que les tubes en verre/époxy, ce qui les rend plus adaptés pour résister au flambement sous des charges de compression élevées et maintenir leur rigidité. Le choix entre ces deux matériaux doit tenir compte de ces différences pour assurer la performance et la sécurité des tubes dans une application donnée.

Un composite croisé 0/90 est une stratification de matériau composite où les fibres sont disposées à la fois longitudinalement (0 degrés) et transversalement (90 degrés) dans la structure. Cette configuration impacte la charge critique de flambement du matériau. Les effets de cette disposition comprennent le renforcement des propriétés mécaniques dans les deux directions, une meilleure maîtrise de la déformation et de la propagation de la charge, et une amélioration de la résistance à la torsion. En résumé, le composite croisé 0/90 peut augmenter la charge critique de flambement en renforçant les propriétés mécaniques, en contrôlant la déformation et en améliorant la résistance à la torsion, des aspects cruciaux à prendre en

considération lors de la conception et de l'analyse des structures composites pour assurer leur stabilité et leur sûreté face au flambement.

Références

- [1]. Kubiak T, Kolakowski Z, Swiniarski J, Urbaniak M, Gliszczyński A. Local buckling and post-buckling of composite channel-section beams – Numerical and experimental investigations. *Compos Part B Eng* 2016;91:176-188.
- [2]. Sessa S, Serpieri R, Rosati L. A continuum theory of through-the-thickness jacketed shells for the elasto-plastic analysis of confined composite structures: Theory and numerical assessment. *Compos Part B Eng* 2017;113:225-242.
- [3]. Jia X, Chen G, Yu Y, Li G, Zhu J, Luo X, Duan C, Yang X, Hui D. Effect of geometric factor, winding angle and pre-crack angle on quasi-static crushing behavior of filament wound CFRP cylinder. *Compos Part B Eng* 2013;45(1):1336-1343.
- [4]. Hu H-T and Chen H-C. Buckling optimization of laminated truncated conical shells subjected to external hydrostatic compression. *Compos Part B Eng* 2018;135:95-109.
- [5]. Burgueño R, Hu N, Heeringa A, Lajnef N. Tailoring the elastic postbuckling response of thin-walled cylindrical composite shells under axial compression. *Thin Wall Struct* 2014;84:14-25.
- [6]. Tafreshi A. Efficient modelling of delamination buckling in composite cylindrical shells under axial compression. *Compos Struct* 2004;64(3-4):511-520.
- [7]. White SC, Weaver PP, Wu KC. Post-buckling analyses of variable-stiffness composite cylinders in axial compression. *Compos Struct* 2015;123:190-203.
- [8]. Bisagni C and Cordisco P. Post-buckling and collapse experiments of stiffened composite cylindrical shells subjected to axial loading and torque. *Compos Struct* 2006;73(2):138-149.
- [9]. Stedile Filho P, Almeida Jr. JHS, Amico SC. Carbon/epoxy filament wound composite drive shafts under
- [10] S. T. S. Al-Hassani, M. Darvizeh* & H. Haftchenari “An analytical study of buckling of composite tubes with various boundary conditions” *Composite Structures* Vol. 39, No. 1-2, pp. 157-164, 1997-[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00135-9)
- [11] José Humberto S. Almeida, Jr., Maikson L.P. Tonatto, Marcelo L. Ribeiro, Volnei Tita, Sandro C. Amico “Buckling and post-buckling of filament wound composite tubes under axial compression: linear, nonlinear, damage and experimental analyses” *JCOMB* 5674-Composites Part B - <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.004>
- [12] Ruijie Zhu, Feng Li*, and Dongdong Zhang “Overall buckling behaviour of laminated CFRP tubes with off-axis ply orientation in axial compression” *Sci Eng Compos Mater* 2019; 26:230–239- <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0007>.

- [13] Jose Humberto S. Almeida*, Lars Bittricha, Eelco Jansenb, VolneiTitac, Axel Spickenheuera “Buckling optimization of composite cylinders for axial compression: A design methodology considering a variable-axial fiber layout” *Composite Structures* 222 (2019) 110928- <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110928>
- [14] A.J.M. Ferreira , J.T. Barbosa “Buckling behaviour of composite shells - *Composite Structures* 50 (2000) 93±98
- [15] Haozhong Gu, Aditi Chattopadhyay “ Three-dimensional elasticity solution for buckling of composite laminates - *Composite Structures* 50 (2000) 29-35
- [16] B. Geier, Singh “ I Some simple solutions for buckling loads of thin and moderately thick cylindrical shells and panels made of laminated composite material- *Aerospace Science and Technology*, 1997, no 1, 47-63.
- [17] B. Geier, H.-R. Meyer-Piening , R. Zimmermann “On the influence of laminate stacking on buckling of composite cylindrical shells subjected to axial compression”- *Composite Structures* 55 (2002) 467–474
- [18] Ozgur Erdal, Fazil O. Sonmez “Optimum design of composite laminates formaximum buckling load capacity using simulated annealing- *Composite Structures* -Volume 71, Issue 1, October 2005, Pages 45-52 -doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.09.008
- [19] Abderrahmane Bentouhami, Boualem Keskes experimental analysis and modelling of the buckling of a loaded honeycomb sandwich composite - ISSN 1580-2949-Original scientific article - *Materiali in tehnologije / Materials and technology* 49 (2015) 2, 235–242
- [20] Mete Onur kaman, Murat yavuzsolmaz “Experimental and Numerical Analysis of Critical Buckling Load of Honeycomb Sandwich Panels” *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 44, No. 24/2010
- [21] Donnell, L.H., A New Theory for the Buckling of Thin Cylinders under Axial Compression and Bending. *Transactions of the ASME*, 1934, Vol.56, pp.795-806.
- [22] Flugge, W., *Die Stabilität der Kreiszyinderschalen*. *Ingenieur-Archiv*, 1932, Vol.3, pp.463-506.
- [23] Flügge, W., *Stresses in Shells*. Berlin : Springer Verlag, 1973, 525p.
- [24] Koiter, W.T., *On the Stability of Elastic Equilibrium*. Ph.D. Thesis, 1945, TH-Delft, Netherlands, H.J. Paris, Amsterdam (In Dutch). (English translation : NASA TT F-10, 1967, 322p).
- [25] Lorenz, Z., *Achsensymmetrische Verzerrungen in dunwandigen Hohlzylinder*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1908, Vol. 52, pp.1766-1793.
- [26] Love, A.E.H., *On the small free vibrations and deformations of elastic shells*. *Philosophical transactions of the Royal Society, London*, 1888, Series A, n° 17, pp.491–549.

- [27] Sanders, J.L., Nonlinear Theories for Thin Shells. Quarterly Journal of Applied Mathematics, England, 1963, Vol.20, n°1, pp.20-36.
- [28] Southwell, R.V., On the general theory of elastic stability. Philosophical transactions of the Royal Society, London, 1914, Series A, n°213, pp.187-202.
- [29] Timoshenko, S.P., Einigestabiats Probleme der Elastizitats theorie. Zeitschriftfür Angewandte Mathematikund Physik, 1910, Vol. 58, pp.337-357.
- [30] Berthelot J.-M. (1999). Composite Materials. Mechanical Behaviour and Structural Analysis, SPRINGER-VERLAG, New York, Paris.