

Faculty of Sciences and Technology  
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2023

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique

## *Thème*

**Caractérisation mécanique  
des pipelines sandwich**

Présenté par :

❖ Cheikh Habib

*Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :*

Président	Pr. OUINAS Djamel	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. ZAOUI Fatima	Université de Mostaganem UMAB
Encadrant	Dr. CHENINE Halima	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2022 / 2023

## Remerciements

Le succès de tout projet dépend de l'effort fourni et de la participation des individus. Mais ses résultats sont le fruit des conseils et des encouragements reçus, et j'en profite pour exprimer ma gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadrante de mémoire Madame Chenine Halima, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter mes réflexions.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux honorables membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail, le président du jury, monsieur le Professeur OUIINAS Djamel, ainsi qu'à Madame l'examinatrice Docteur ZAOUÏ Fatima.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de la faculté FST de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, responsable de ma formation et pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Enfin je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

## ملخص

بسبب كثافتها المنخفضة وقوتها المنخفضة، يتم استخدام مركبات السندويتش بشكل متزايد في مختلف الصناعات، والتي جذبت اهتمامًا كبيرًا من الباحثين. يتكون العمل الذي سيتم تنفيذه بشكل خاص من اختبار الخواص الميكانيكية لمركبات السندويتش المعرضة للانحناء بثلاث نقاط. ستكون الأداة لهذا الغرض هي تحليل أوضاع فقدان الصلابة والضرر. يجب مراعاة تباين العديد من المعلمات وسيتم إجراء الدراسة باستخدام كود Abaqus.

الكلمات المفتاحية - الشقوق، الشظيرة المركبة، الانحناء ثلاثي النقاط، الأنبوب المركب ، تحليل العناصر المحدودة.

## Résumé

En raison de leur faible densité et de leur faible résistance, les composites sandwich sont de plus en plus utilisés dans diverses industries, ce qui a suscité un grand intérêt de la part des chercheurs. Les travaux à réaliser consistent notamment à tester les propriétés mécaniques des composites sandwich soumis à une flexion 3 points. L'outil à cet effet sera l'analyse des modes de perte de rigidité et d'endommagement. La variabilité de plusieurs paramètres doit être prise en compte et l'étude sera réalisée à l'aide du code Abaqus.

**Mots clés** —Entailles, Composite sandwich, Flexion 3 points, Pipe en composite, Analyse par éléments finis.

## Abstract

Due to their low density and low strength, sandwich composites are increasingly used in various industries, which has attracted great interest from researchers. The work to be carried out consists in particular in testing the mechanical properties of sandwich composites subjected to 3-point bending. The tool for this purpose will be the analysis of the modes of loss of rigidity and damage. The variability of several parameters must be taken into account and the study will be carried out using the Abaqus code.

**Keywords** —Notches, Composite sandwich, 3-point bending, Composite pipe, Finite element analysis.

# Sommaire

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<i>Chapitre I</i> .....	2
Généralités sur les composites .....	2
<b>I.1. Rappels sur les composites .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1.1. Classification des matériaux composites.....</b>	<b>2</b>
I.1.1.1. Composites à renforts de particules .....	2
I.1.1.2. Composites à renforts de paillettes.....	3
I.1.1.3. Composites à renforts de fibres .....	3
I.1.1.4. Composites stratifiés.....	3
I.1.1.5. Composites à matrice polymérique .....	3
I.1.1.6. Composites à matrice métallique.....	4
I.1.1.7. Composites à matrice céramique.....	4
<b>I.1.2. Constituants des matériaux composites .....</b>	<b>4</b>
I.1.2.1. Les fibres.....	4
I.1.2.1.1. Fibres de verre.....	5
I.1.2.1.2. Fibres de carbone .....	5
I.1.2.1.3. Fibres aramides .....	5
I.1.2.2. Les matrice .....	6
<b>I.2. Matériaux sandwich .....</b>	<b>6</b>
I.2.1. Les peaux (ou semelles) .....	7
I.2.2. L'âme.....	7
I.2.2. L'adhésif de surface (ou interface) .....	7
<b>I.3. Comportement en flexion trois points des matériaux sandwich.....</b>	<b>7</b>
<i>Chapitre II</i> .....	9
Etude Numérique.....	9
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>II.2. Modèles expérimental du pipe stratifié sans entailles .....</b>	<b>9</b>
<b>II.2.1. Essai de Flexion 3 points .....</b>	<b>13</b>
II.2.1.1. Essai de Flexion 3 points sur les éprouvettes de grandes épaisseurs.....	14
II.2.1.1.1. Eprouvettes sans entaille de grande épaisseur.....	14
II.2.1.1.2. Eprouvettes de grande épaisseur et entaille de 4.07 mm .....	16
II.2.1.1.3. Eprouvettes de grande épaisseur et entaille de 5.55 mm .....	17
II.2.1.2. Essai de Flexion 3 points sur les éprouvettes de petites épaisseurs .....	18

<b>II.2.1.2.1. Eprouvettes de petites épaisseurs sans entaille .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1.2.2. Eprouvettes de petites épaisseurs et entaille de 4.07 mm.....</b>	<b>20</b>

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I. 1. Matériaux Composite .....	2
Figure I. 2. Classification des Matériaux Composites .....	3
Figure I. 3. Les Fibres .....	5
Figure I. 4. Structure Sandwich .....	6
Figure I. 5. Flexion 3 Points .....	8

## Chapitre II

Figure II. 1. Échantillons étudiés .....	9
Figure II. 2. Découpage des échantillons à partir du pipe en sandwich .....	10
Figure II. 3. Pipelines en composite sandwich .....	10
Figure II. 4. Micrographie d'un sandwich d'une éprouvette de grande épaisseur et de petite épaisseur. ....	10
Figure II. 5. Cas d'éprouvettes étudiés .....	11
Figure II. 6. Représentation du maillage de l'éprouvette sans entaille.....	12
Figure II. 7. Représentation du maillage de l'éprouvette avec entaille .....	12
Figure II. 8. Cas d'éprouvettes étudiées .....	12
Figure II. 9. Schéma statique de l'essai de flexion 3 points.....	13
Figure II. 10. Déflexion des éprouvettes de grandes épaisseurs sans entaille .....	15
Figure II. 11. Résultats de éprouvettes grande épaisseur sans entaille.....	15
Figure II. 12. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur. ....	15
Figure II. 13. Déflexion des éprouvettes de grandes épaisseurs avec entaille .....	16
Figure II. 14. Résultats de l'éprouvette grande épaisseur avec entaille 5.55mm grande profondeur .....	16

<b>Figure II. 15. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 4.07 mm et une grande profondeur.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure II. 16. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 4.07 mm en petite profondeur.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure II. 17. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec entaille de 5.55 mm de grande profondeur. ....</b>	<b>17</b>
<b>Figure II. 18. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 5.55 mm de petite profondeur.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure II. 19. Déflexion des éprouvettes de petites épaisseurs avec entaille .....</b>	<b>18</b>
<b>Figure II. 20. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figure II. 21. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec entaille de 4.07 mm, de grande profondeur. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figure II. 22. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille de 4.07 mm de petite profondeur.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure II. 23. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille de 5.55 mm de grande profondeur .....</b>	<b>21</b>
<b>Figure II. 24. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille 5.55mm de petite profondeur.....</b>	<b>21</b>

## **Liste des Tableaux**

<b>Tableau II. 1. Propriétés mécaniques du pipe sandwich.....</b>	<b>13</b>
<b>Tableau II. 2. Représentation des caractéristiques de chaque éprouvette de grande épaisseur... </b>	<b>14</b>
<b>Tableau II. 3. Représentation des caractéristiques de chaque éprouvette de petite épaisseur. ....</b>	<b>19</b>



## Liste des Symboles

$\sigma_{\text{Ultime}}$	Contrainte normale élastique (MPa)
$\epsilon_e$ :	Déformation relative élastique
$E_{\text{ap}}$ :	Module de flexion apparent (GPa)
P	Charge appliquée
Y	Flèche enregistrée (mm)
F	la force (N)
E	Module de Young (GPa)
k :	la rigidité en (N/mm)
y :	la flèche en (mm)
P :	pression en (Pa)
L :	longueur en (mm)
E :	module de Young,
I :	moment d'inertie,
h :	épaisseur en (mm),
B :	largeur en (mm).
G.P :	grande profondeur.
P.P :	petite profondeur.

## Introduction Générale

Ces dernières années, l'utilisation des matériaux composites dans l'industrie mondiale n'a cessé d'augmenter, rapidement et régulièrement, notamment soutenue par la diversité des applications (aéronautique, ferroviaire, navale, automobile, aérospatiale, etc..)

Actuellement, les pipelines sont considérés comme le moyen le plus essentiel pour le transport massif de fluides pour les loins ou proches distances[1], leur débit important et leur mises en évidence, qu'ils sont le mode le plus sûr et le plus écologique de transport des fluides. Ils peuvent être fabriqués en acier, en PVC, en aluminium ou en composite sandwich selon la nature de fluide à transporter... Aujourd'hui, en remarquant les nombreuses défaillances lors de l'exploitation des pipes en acier exposés aux milieux corrosifs, la meilleure solution est de fabriquer les pipes en composite[2]. Un bon rapport entre le poids et la résistance est nécessaire, aussi une bonne modélisation des pipes pour une exploitation rationnelle et pour prolonger la durée de vie. Les chargements thermiques ou mécaniques provoquent une instabilité sur les structures minces. Ainsi, les défauts géométriques réalisés au niveau des structures sont les endroits de l'apparition de l'endommagement[3,4].

Notre travail consiste à étudier L'effet des défauts géométriques sur les pipelines sandwich, ainsi que leurs comportements lors de la flexion. En utilisant le logiciel de simulation « Abaqus ».

Ensuite nous allons comparer nos résultats à des tests expérimentaux fait pas d'autres chercheurs.

Ce mémoire s'articulera sur deux parties :

- Le premier chapitre comprend des notions bibliographiques sur les matériaux composites et les matériaux sandwich et un petit aperçu sur la flexion 3 points.
- La deuxième partie, regroupe les résultats obtenus numériquement pour des éprouvettes sans défauts géométriques et avec différentes entailles au milieu de nos échantillons.

Enfin une conclusion synthétisant les principaux résultats

# *Chapitre I*

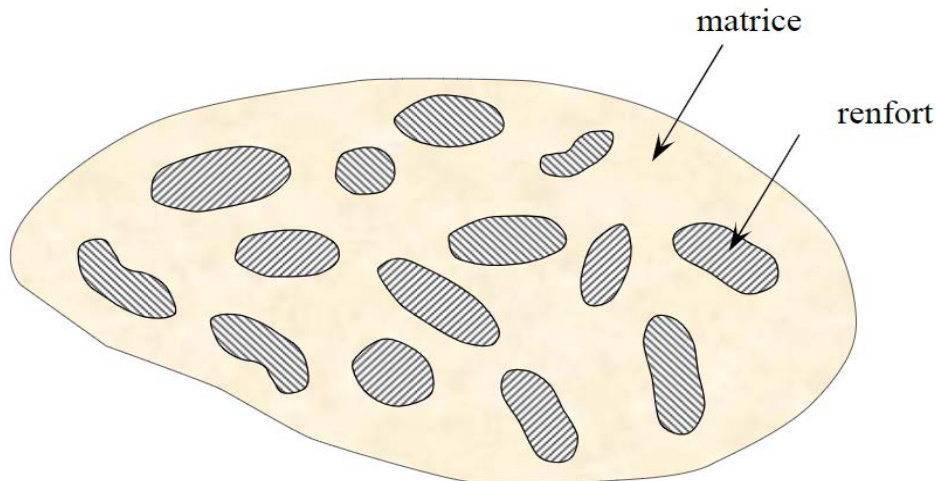
---

Généralités sur les composites

## I.1. Rappels sur les composites

Un composite est un assemblage de plusieurs matériaux aux différentes propriétés et caractéristiques. Cet assemblage donne au matériau ainsi constitué de meilleures propriétés que ses composants. Le choix des composants ayant un impact direct sur la structure, les composites permettent une adaptabilité quasi illimitée[5,6].

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant [7].



**Figure I. 1. Matériaux Composite**

### I.1.1. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon diverses façons. Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts. Les composites sont donc divisés en quatre catégories (figure I.2).

#### I.1.1.1. Composites à renforts de particules

Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

### I.1.1.2. Composites à renforts de paillettes

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan[8].

### I.1.1.3. Composites à renforts de fibres

Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues) [8].

### I.1.1.4. Composites stratifiés

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

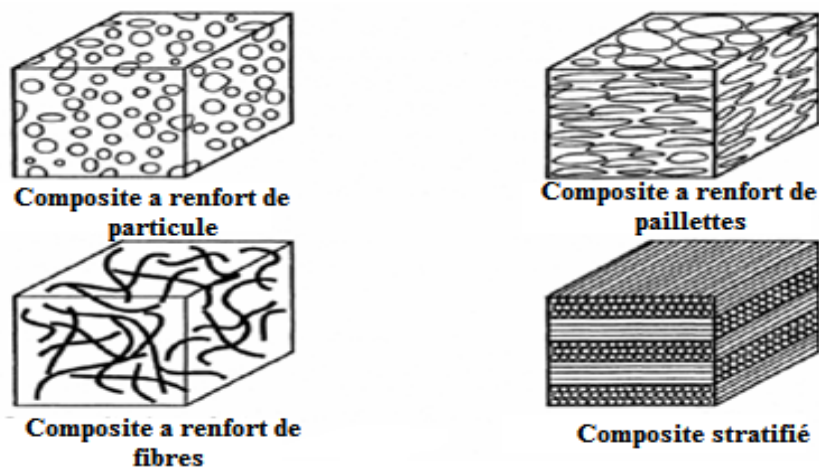


Figure I. 2. Classification des Matériaux Composites

Les matériaux composites peuvent également être classés par la nature de la matrice comme suit :

### I.1.1.5. Composites à matrice polymérique

Les polymères sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture. Les avantages principaux sont le

procédé de fabrication relativement mature et le poids faible. Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de poids est essentielle.

#### **I.1.1.6. Composites à matrice métallique**

Dans ces composites, des matériaux métalliques comme l'aluminium et le titane sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. De par la nature même du composite, les composites à matrice métallique ont des propriétés mécaniques meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices monolithiques. Leurs applications dans les moteurs d'automobile sont bien établies.

#### **I.1.1.7. Composites à matrice céramique**

Des matrices céramiques telles que le verre et le carbure de silicium (SiC) peuvent être associées aux renforts comme des métaux, le carbone, et des céramiques. Leur développement a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que ténacité et résistance au choc thermique des céramiques monolithiques. Ces composites sont utilisés dans des environnements sévères, par exemple les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz.

### **I.1.2. Constituants des matériaux composites**

Les propriétés mécaniques des composites fibreux sont directement liées aux caractéristiques mécaniques de leurs constituants : la fibre, la matrice, ainsi que l'interphase. La résistance et la rigidité d'un composite sont assurées principalement par les fibres qui possèdent des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que la matrice. Cette dernière, quant à elle, réunit les fibres et donne la forme géométrique de la structure. La matrice sert également à transférer les efforts mécaniques entre les fibres et les protéger contre les environnements

Quelques-uns des constituants les plus couramment utilisés seront présentés.

#### **I.1.2.1. Les fibres**

Dans un composite fibreux, la tenue mécanique est assurée principalement par les fibres. Par sa nature filamenteuse, la rupture de quelques fibres a pour résultat la redistribution du chargement sur les autres fibres, ce qui empêche la rupture catastrophique de la structure. Les fibres les plus souvent rencontrées dans les composites sont les suivantes [8].

### I.1.2.1.1. Fibres de verre

Ces fibres sont très répandues dans des applications basses performances ainsi que des applications hautes performances telle que les réservoirs de propulseurs de fusée. Leurs avantages incluent prix compétitif, disponibilité, et résistance élevée. Cependant, à cause de leur rigidité relativement faible, les fibres de verre sont progressivement remplacées par les fibres aramides ou les fibres de carbone dans les applications hautes performances (figure I.3.a).

### I.1.2.1.2. Fibres de carbone

Actuellement, les fibres de carbone sont le renfort le plus répandu pour les matériaux composites hauts performances. Deux avantages principaux de ces fibres sont leur fabrication plus adaptée à la production à grande échelle que d'autres fibres hautes performances et leurs excellentes propriétés mécaniques plus facilement transférables aux matériaux composites. Leur prix reste toutefois prohibitif pour les produits grand public (figure I.3.b).

### I.1.2.1.3. Fibres aramides

Ces fibres appartiennent à la famille des fibres polyamides aromatiques. Les versions commerciales disponibles incluent le Kevlar (nom déposé) et le Nomex (nom déposé). Elles possèdent une résistance élevée et une rigidité considérablement supérieure à celle des fibres de verre. La tolérance aux dommages est très bonne également. Leurs désavantages incluent une résistance en compression inférieure à celle des fibres de carbone et une adhésion relativement faible aux matrices (figure I.3.c).

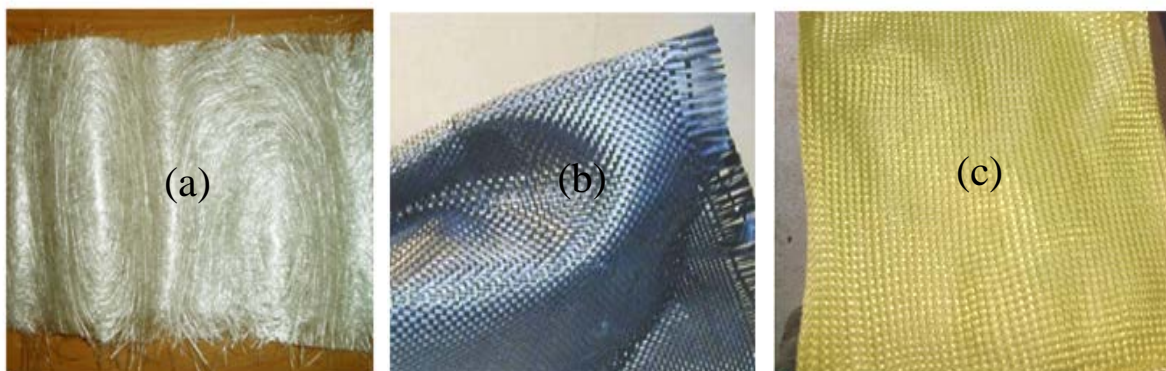


Figure I. 3. Les Fibres

### I.1.2.2. Les matrice

La matrice réunit les fibres par ses caractéristiques cohésive et adhésive. Elle maintient les fibres dans leur orientation et leur position prévues pour les charges appliquées. Ses autres rôles consistent à distribuer les efforts entre les fibres, fournir une résistance à la propagation de fissure, et fournir toutes les résistances en cisaillement du composite. La matrice détermine en général la limite de la température d'utilisation et l'environnement de service du matériau.

En raison de la complexité du rôle de la matrice organique, le choix résulte d'un compromis entre des impératifs technologiques d'une part, un niveau de performance et le coût du composite final d'autre part. Ces impératifs entraînent l'utilisation de quatre grandes familles de polymères [9].

## I.2. Matériaux sandwich

Deux familles de composites se distinguent surtout dans de nombreuses combinaisons possibles : sandwichs et stratifiés.

Les sandwichs sont constitués d'un matériau léger et résistant en compression appelé « âme » collé entre deux « peaux » en matériau ayant de bonnes caractéristiques en traction. Tout cela confère au matériau ainsi formé une résistance à la flexion élevée avec un gain de masse souvent élevé. En revanche, il existe un risque important de flambage pouvant entraîner un décollement des peaux. Les âmes sont classiquement constituées de mousses, de polymères ou de structures en nids d'abeilles. La peau est généralement une plaque métallique, du contreplaqué ou un matériau composite stratifié. L'utilisation de ces matériaux s'étend de la structure porteuse, des satellites de télécommunications aux planches à voile, en passant par les panneaux d'isolation thermique ou acoustique [8].

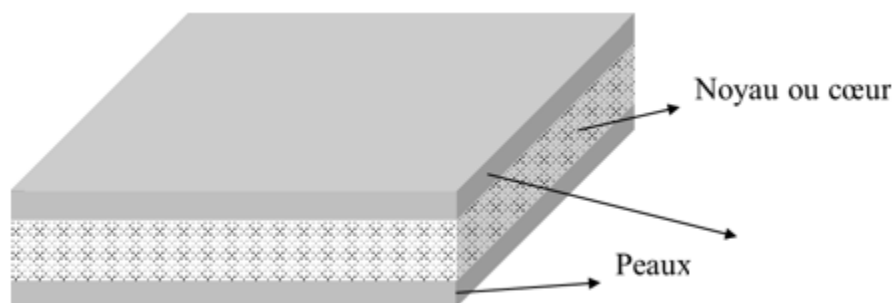


Figure I. 4. Structure Sandwich



### **I.2.1. Les peaux (ou semelles)**

Généralement planes, qui reprennent les efforts de flexion. Elles peuvent être de plusieurs natures : en métal, en stratifié, en bois (contreplaqué) ou encore en plaque thermoplastique. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais en général, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées.

### **I.2.2. L'âme**

C'est l'élément central d'une structure sandwich. Elle se caractérise par une faible masse et des faibles caractéristiques mécaniques. Son rôle principal est de supporter les efforts de compression et de cisaillement engendrés à la suite du mouvement de glissement des peaux sous chargement, et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique. Les types d'âmes les plus communs dans le secteur industriel sont : le bois de balsa, les nids d'abeilles et les mousses en polymères rigide

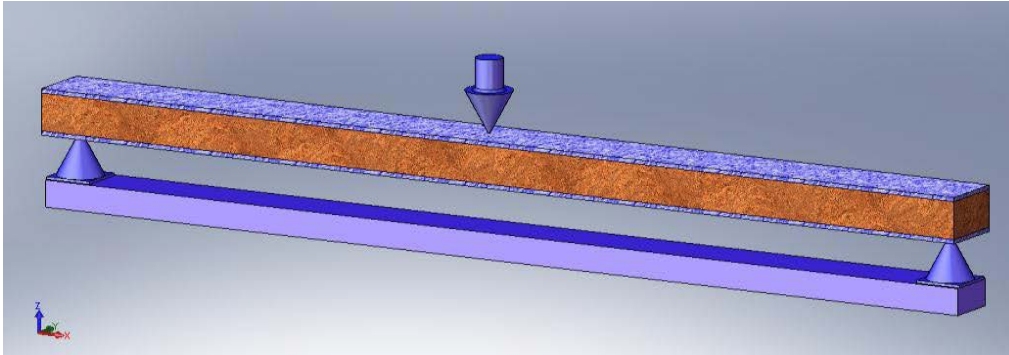
### **I.2.2. L'adhésif de surface (ou interface)**

Cet élément est d'une importance cruciale, il solidarise l'âme et les peaux. Il doit permettre un bon assemblage de la structure en formant une liaison continue, non poreuse et d'épaisseur constante. Par ailleurs, et une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre est nécessaire, Pour cela, la principale caractéristique de l'adhésif doit être une bonne résistance au cisaillement. Dans le cas de peaux en matériau composite, l'insertion de cette troisième phase peut être évitée par l'utilisation d'une résine auto-adhésive[10]

## **I.3. Comportement en flexion trois points des matériaux sandwich**

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

Lorsqu'on augmente progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituants de la poutre[11].



**Figure I. 5. Flexion 3 Points**

# *Chapitre II*

---

Etude Numérique

## II.1. Introduction

Parmi toutes les idées de conceptions possibles dans les structures composites, l'idée des sandwichs dans la construction est devenue de plus en plus populaire en raison du développement de matériaux cellulaires artificiels en tant que matériaux centraux[12].

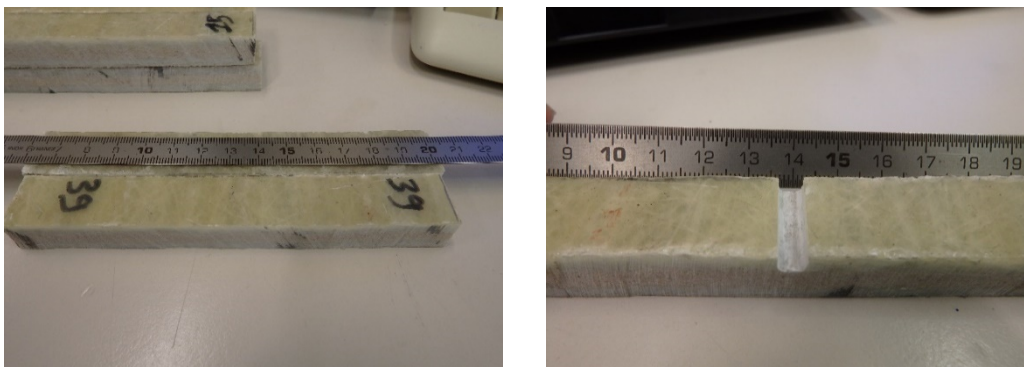
Les structures sandwich sont un type particulier de composite caractérisé par la combinaison de différents matériaux liés entre eux, contribuant avec leurs propriétés uniques à la performance structurelle globale. Habituellement, la structure sandwich est divisée en trois couches : deux externes minces et rigides et une centrale épaisse et flexible, l'ensemble forme une structure d'une grande légèreté, et résistante[13,14].

Dans le cadre de conception et modélisation des pipelines en composite sandwich, plusieurs travaux sont lancés dans l'intention de prolonger leurs durées de vie et de rationaliser leurs exploitations. Pour les pipelines des défauts géométriques jouent un grand rôle à leurs instabilités.

Le présent travail est focalisé sur le phénomène de flexion 3 points d'un pipeline en composite sandwichs. Des essais sans et avec des entailles ont été fait pour voir l'effet des défauts géométriques sur la fiabilité de nos échantillons et valider les résultats expérimentaux fait par H. Chenine[15], nous avons procédé à des tests numériques à l'aide du code Abaqus

## II.2. Modèles expérimental du pipe stratifié sans entailles

Pour notre partie de travail, des essais sur des éprouvettes en composite sandwich ont été étudié, à partir du model découpé à partir d'un pipeline par H.Chenine , des échantillons de longueur  $L=140$  mm (Figure II.1)



**Figure II. 1. Échantillons étudiés[15].**



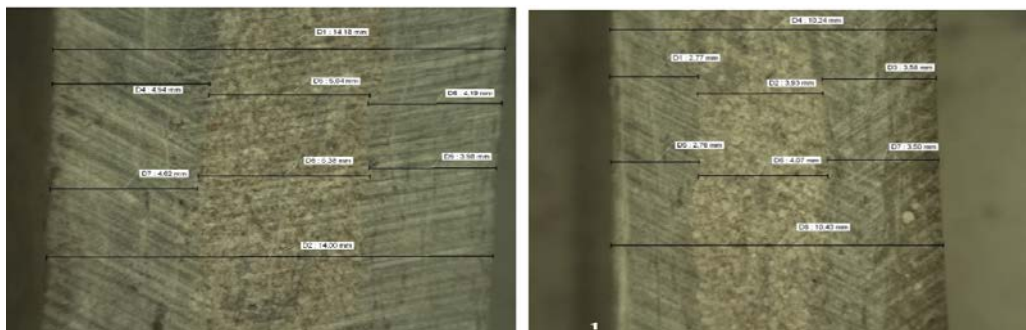
**Figure II. 2. Découpage des échantillons à partir du pipe en sandwich[15]**

Le pipeline est constitué de 2 couches en composite formées de fibres de verre (E-glass) orientées à  $0^\circ$  et de résine isophtalique séparées par une âme en sable (Figure II. 3)



**Figure II. 3. Pipelines en composite sandwich [15]**

Une épaisseur d'environ 14 mm pour les éprouvettes de grandes épaisseurs (Figure II.4.a) et d'environ 10 mm pour les éprouvettes de petites épaisseurs. (Figure II.4.b)



**Figure II. 4. Micrographie d'un sandwich d'une éprouvette de grande épaisseur et de petite épaisseur[15].**

## II.2. Modèles et maillage numérique du pipeline stratifié sans entailles

Afin de connaître la ductilité de notre structure vis-à-vis de la flexion, la variabilité de plusieurs paramètres doit être prise en compte, quatre cas ont été exposé (Figure II.5).

- Le premier cas est une éprouvette de grande épaisseur sans défauts géométriques.
- Le second cas est une éprouvette de petite épaisseur sans défauts géométriques.
- Le troisième cas, est une éprouvette de grande épaisseur d'environ 14 mm avec quatre différentes entailles,  $e = 4.07$  mm avec deux différentes profondeurs et  $e=5.55$  mm avec les mêmes profondeurs.
- Le quatrième cas les mêmes entailles ont été créés sur des éprouvettes de petites épaisseurs (10 mm).

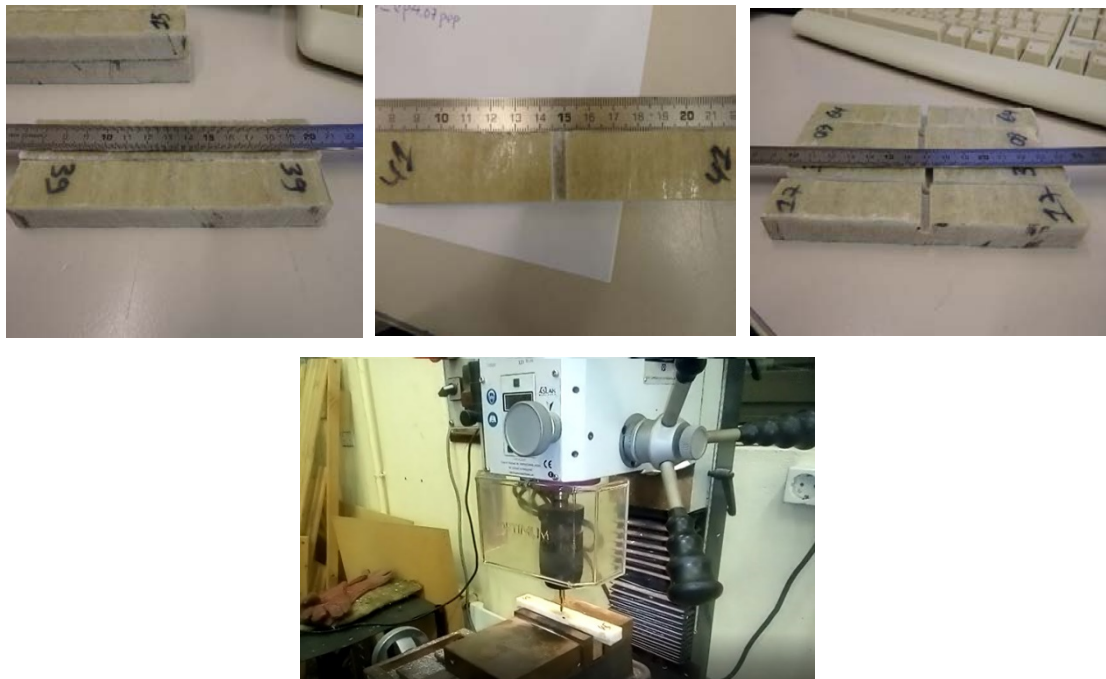


Figure II. 5. Cas d'éprouvettes étudiés[15].

Les figures (II.6, II.7et II.8) illustrent les cas étudiés. Notre structure a été modélisée par 25272 éléments quadrilatéraux de type S8R. Trois points d'intégration de Simpson par pli sont considérés (Figure II.2). Le matériau choisi est représenté dans le tableau II.1

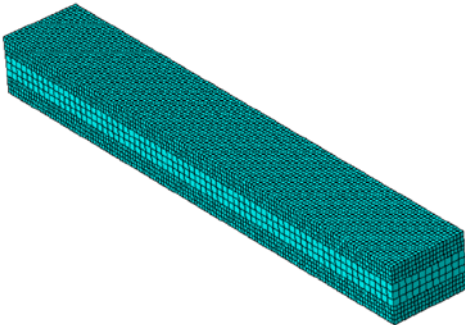


Figure II. 6. Représentation du maillage de l'éprouvette sans entaille

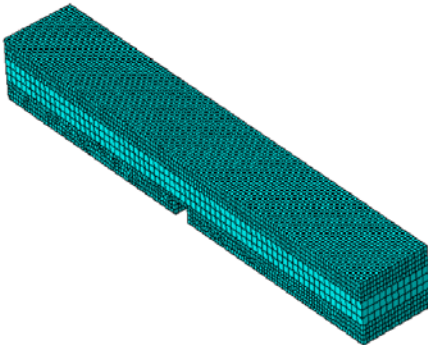


Figure II. 7. Représentation du maillage de l'éprouvette avec entaille

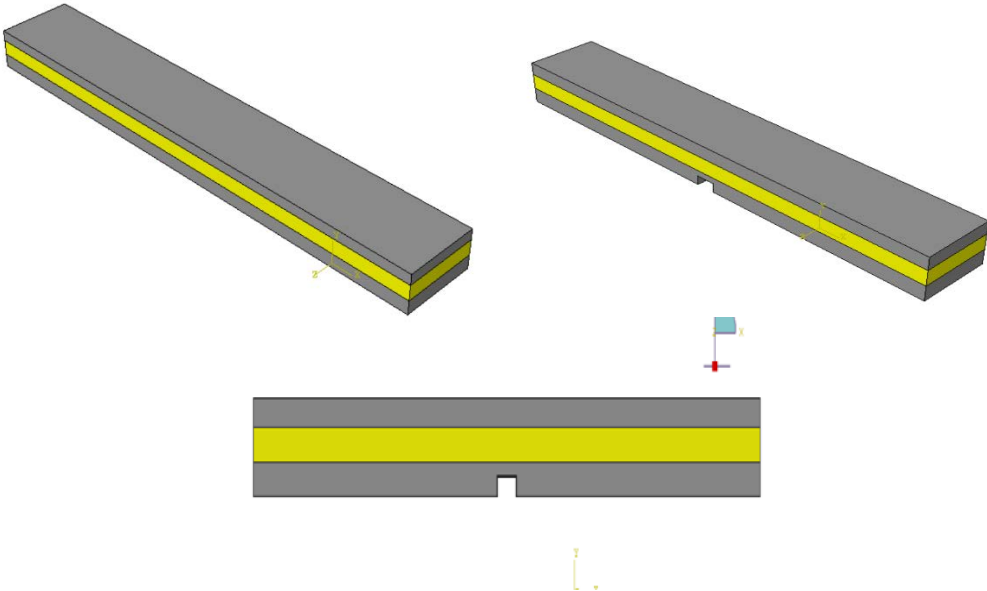


Figure II. 8. Cas d'éprouvettes étudiées

Tableau II. 1. Propriétés mécaniques du pipe sandwich

Propriétés	E-glass
E1(MPa)	29490
E2(MPa)	8400
v12	0.26
G12(MPa)	2032
G13(MPa)	2032
G23(MPa)	1914

### II.2.1. Essai de Flexion 3 points

Les tests de flexion en trois points sont effectués sur Abaqus, Des essais ont été effectués pour chaque type de sandwich, sur des éprouvettes sans entailles, puis avec entailles de différentes tailles. Les dimensions des échantillons testés sont représentées sur la figure (II.8) pour les grandes épaisseurs (14 mm ).

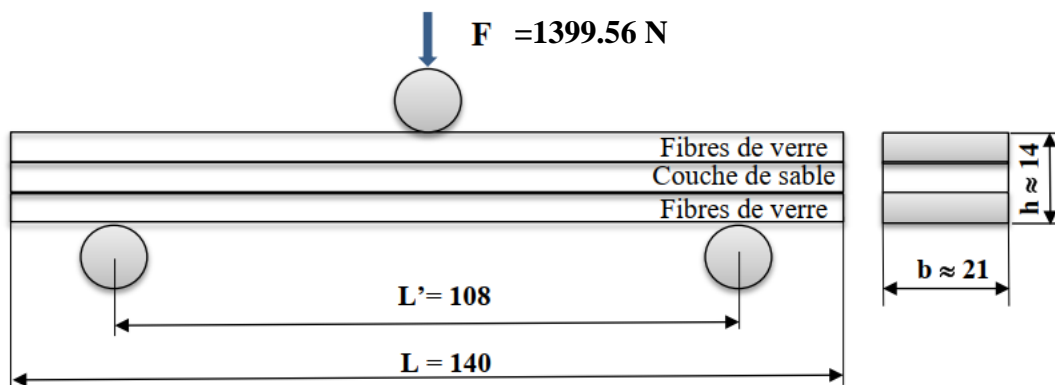


Figure II. 9. Schéma statique de l'essai de flexion 3 points

L : longueur de l'éprouvette

L' : distance entre les deux appuis

Les principales caractéristiques à déterminer par le test de flexion sont la contrainte ultime, la déformation relative ainsi que le module de flexion apparent, qui sont respectivement obtenus par les équations (IV.1, IV.2 et IV.3).

$$\sigma_{ultime} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (II.1)$$

$$\varepsilon_e = \frac{3Y_e h}{L^3} \quad (II.2)$$

$$E_{ap} = \frac{PL^3}{4bh^3Y} \quad (II.3)$$



D'où

$\sigma_{\text{Ultime}}$  : Contrainte normale élastique

$\varepsilon_e$  : Déformation relative élastique

$E_{\text{ap}}$  : Module de flexion apparent

P : Charge appliquée

Y : Flèche enregistrée

(L, h, b) sont respectivement la longueur, l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette à tester.

### II.2.1.1. Essai de Flexion 3 points sur les éprouvettes de grandes épaisseurs

Le tableau II.2 représente les caractéristiques de chaque éprouvette testée pour le cas des grandes épaisseurs

**Tableau II. 2. Représentation des caractéristiques de chaque éprouvette de grande épaisseur.**

Type d'éprouvette	Flèche maximale mm	Charge maximale N
Sans entaille	3.629	2881.22
	3.372	2921.44
Entaille 4.07 mm P. P	3.522	1294.01
	3.295	1223.24
Entaille 4.07 mm G. P	2.633	570.31
	2.497	536.96
Entaille 5.55 mm P. P	3.736	1399.56
	3.781	1404.48
Entaille 5.55 mm G. P	2.334	673.83
	2.669	703.30

**G.P** : Grande Profondeur

**P. P** : Petite profondeur

#### II.2.1.1.1. Eprouvettes sans entaille de grande épaisseur

Dans la figure II.12 on remarque la variation de charge en fonction de la flèche dans le cas d'une éprouvette de grande épaisseur. On voit que la charge augmente progressivement en fonction de la longueur de la flèche, puis on a un délaminage suivi d'une rupture.

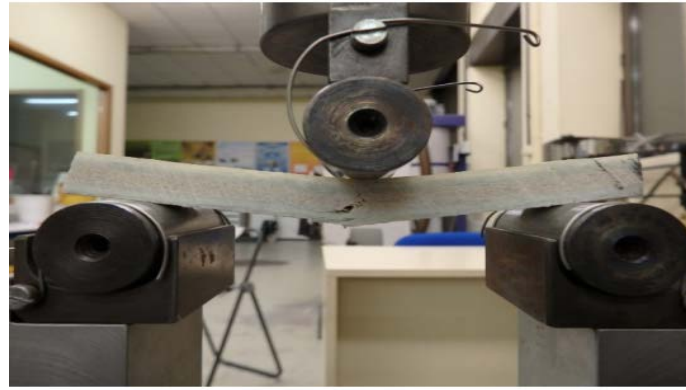


Figure II. 10. Déflexion des éprouvettes de grandes épaisseurs sans entaille [15].

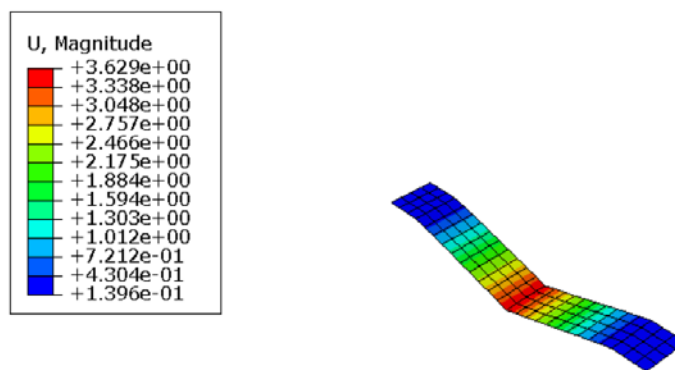


Figure II. 11. Résultats de éprouvettes grande épaisseur sans entaille.

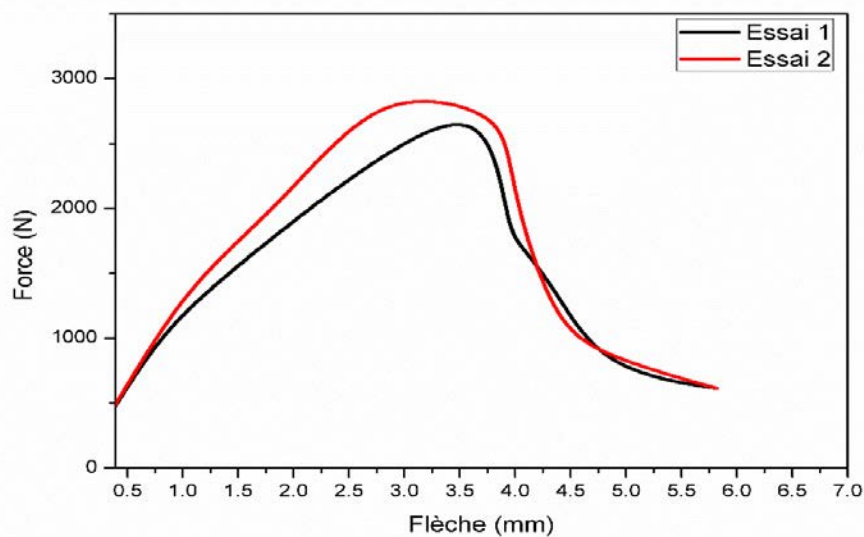


Figure II. 12. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur.

II.2.1.1.2. Eprouvettes de grande épaisseur et entaille de 4.07 mm



Figure II. 13. Déflexion des éprouvettes de grandes épaisseurs avec entaille [15].

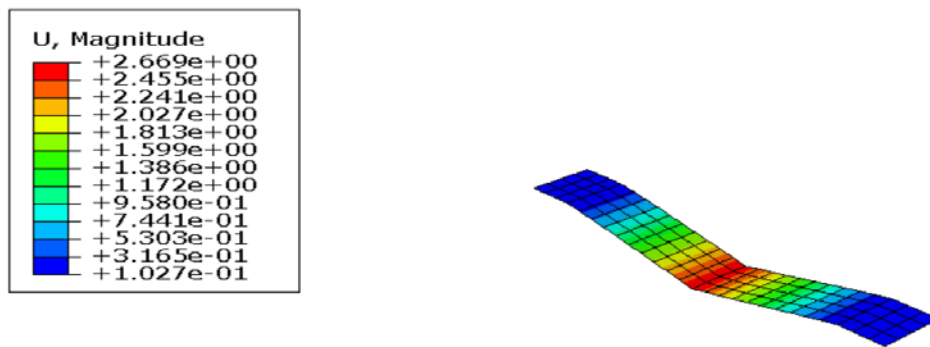


Figure II. 14. Résultats de l'éprouvette grande épaisseur avec entaille 5.55mm grande profondeur

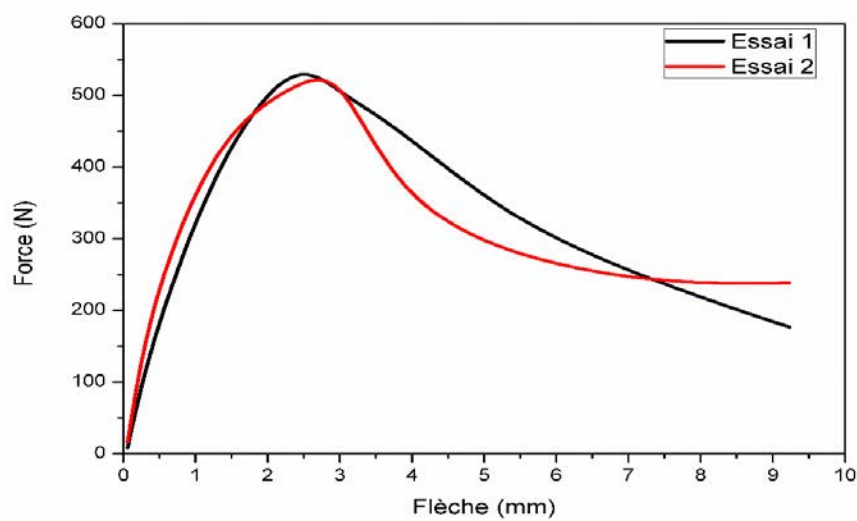
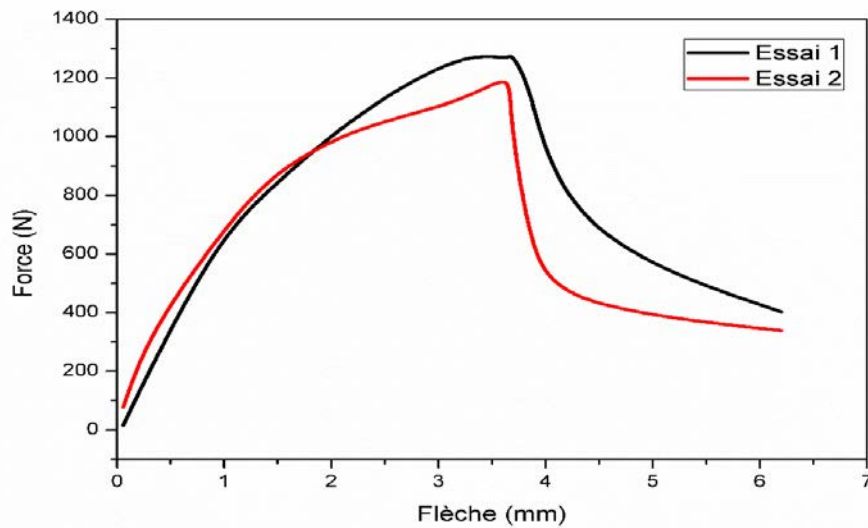


Figure II. 15. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 4.07 mm et une grande profondeur.

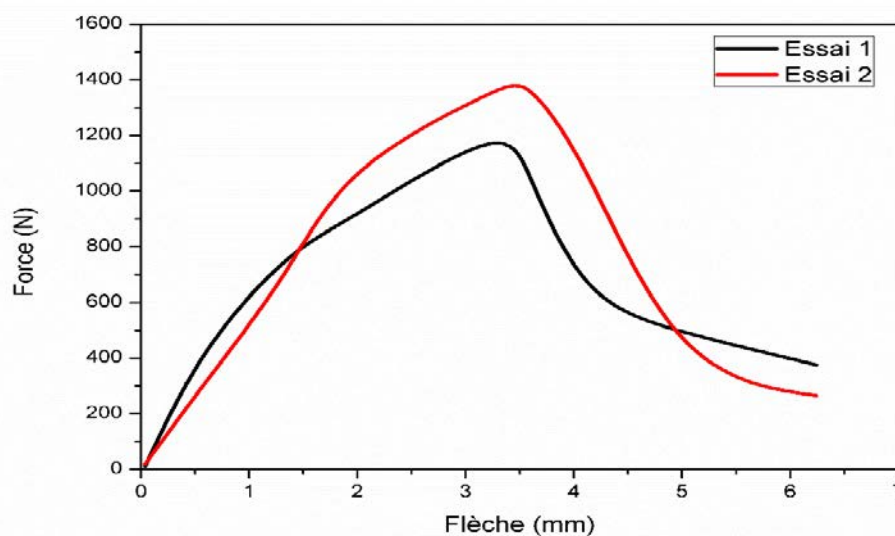


**Figure II. 16. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 4.07 mm en petite profondeur.**

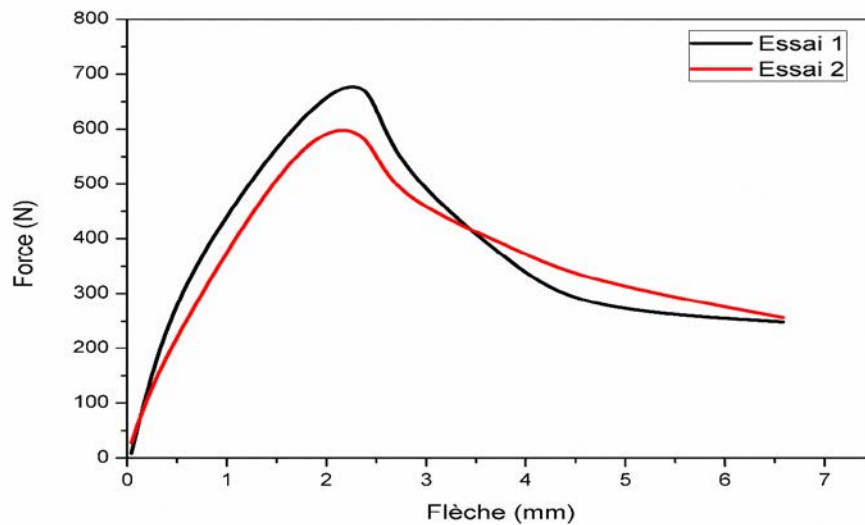
Pour ce cas, les deux figures représentent la variation de charges en fonction du déplacement,

La première pour une grande profondeur figure II.15 et la deuxième pour une petite profondeur figure II.16. On remarque l'augmentation de charge progressivement en fonction de la longueur de la flèche. L'augmentation de cette longueur est lorsque la charge est dans la fourchette de 0 à 570.32 N pour la figure II.15 et elle varie entre 0 et 1294.01 N pour la figure II.16

### II.2.1.1.3. Eprouvettes de grande épaisseur et entaille de 5.55 mm



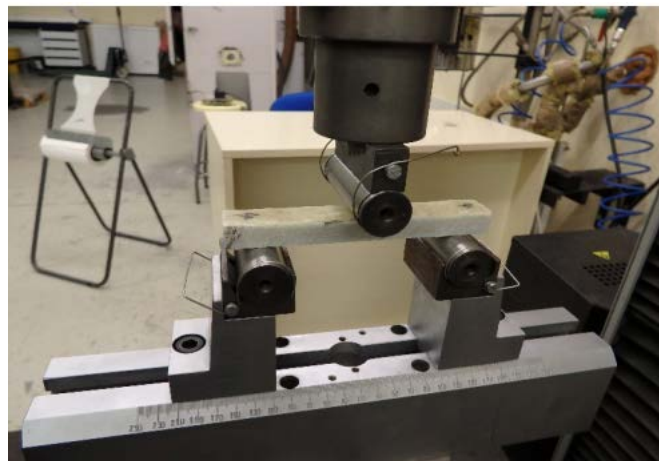
**Figure II. 17. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec entaille de 5.55 mm de grande profondeur.**



**Figure II. 18. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur avec une entaille de 5.55 mm de petite profondeur.**

Dans ce cas les deux figures montrent la variation de charge en fonction de la flèche pour une éprouvette de grande épaisseur entaille 5.55mm avec grande profondeur figure II.17 et une petite profondeur figure II.18. On remarque aussi que la longueur de la flèche augmente avec l'augmentation de la charge .la charge maximale est 1404.48 N pour le premier cas et 707.30 N pour le deuxième cas.

#### II.2.1.2. Essai de Flexion 3 points sur les éprouvettes de petites épaisseurs



**Figure II. 19. Déflexion des éprouvettes de petites épaisseurs avec entaille [15].**

Le tableau II.3. représente les caractéristiques de chaque éprouvette testée pour le cas des grandes épaisseurs

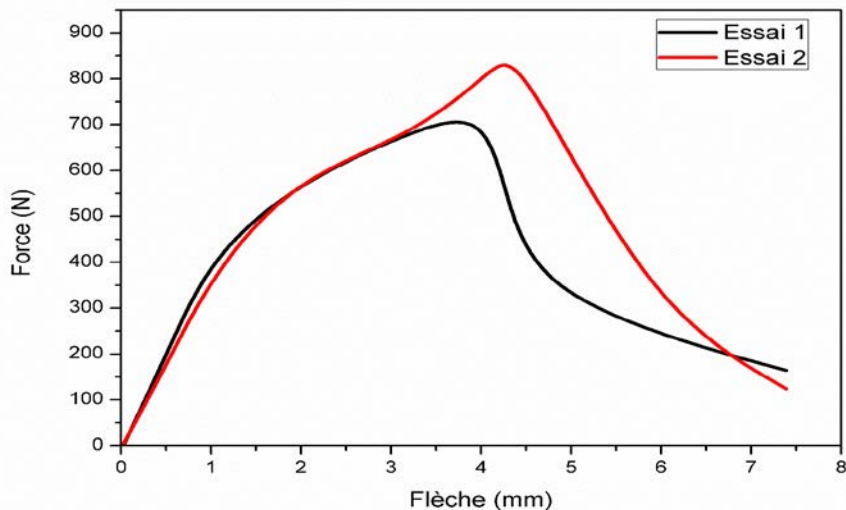
**Tableau II. 3. Représentation des caractéristiques de chaque éprouvette de petite épaisseur.**

Type d'éprouvette	Flèche maximale mm	Charge maximale N
Sans entaille	3.891	941.90
	4.107	989.38
Entaille 4.07 mm P. P	3.611	951.99
	4.842	976.67
Entaille 4.07 mm G. P	3.431.	298.23
	3.670	323.12
Entaille 5.55 mm P. P	3.413	771.59
	3.603	814.46
Entaille 5.55 mm G. P	2.272	300.09
	2.129	280.64

**G.P :** Grande Profondeur

**P. P :** Petite profondeur

#### II.2.1.2.1. Eprouvettes de petites épaisseurs sans entaille

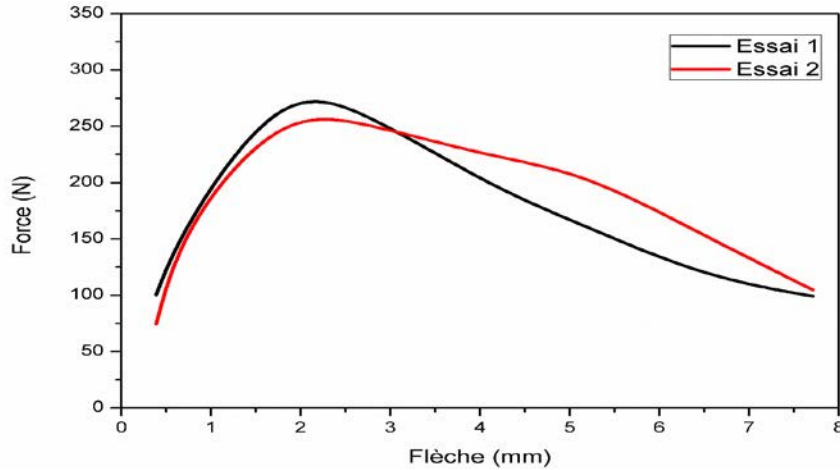


**Figure II. 20. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur.**

La figure II.20 exprime la variation de charge en fonction de la flèche dans le cas d'une éprouvette de petite épaisseur. On remarque l'augmentation progressive de la charge en

fonction de la longueur de la flèche. la charge pour les deux courbes varie entre 0 et 989.38 N, puis on a un délaminage suivi d'une rupture.

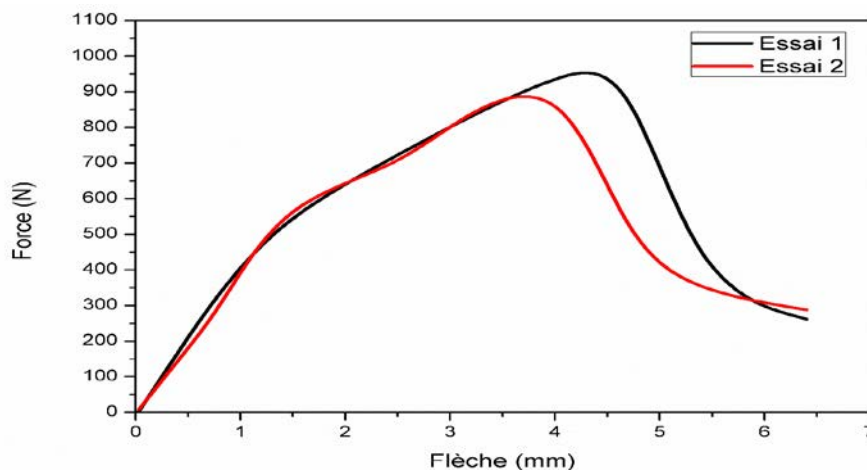
#### II.2.1.2.2. Eprouvettes de petites épaisseurs et entaille de 4.07 mm



**Figure II. 21. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec entaille de 4.07 mm, de grande profondeur.**

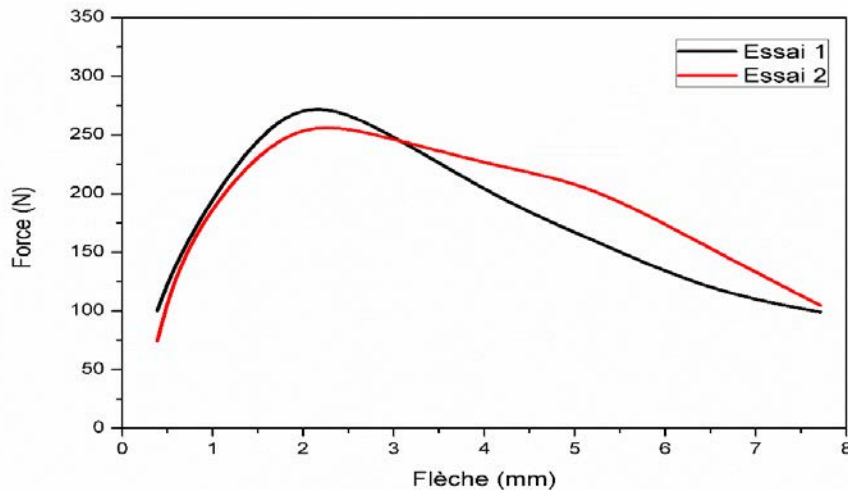
Sur la figure II.21, nous remarquons que la charge est variable en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec entaille de 4.07 mm de grande profondeur. On remarque aussi que la flèche augmente en augmentant les charge jusqu'à la valeur maximale de la charge 323.12 N.

Pour la figure II.22 la charge augmente jusqu'à la valeur 976.67 N. ce qui nous ramène à confirmer que le délaminage et la rupture de l'éprouvette avec entaille de grande profondeur est beaucoup plus précoce que celle d'une éprouvette avec une entaille de petite profondeur.

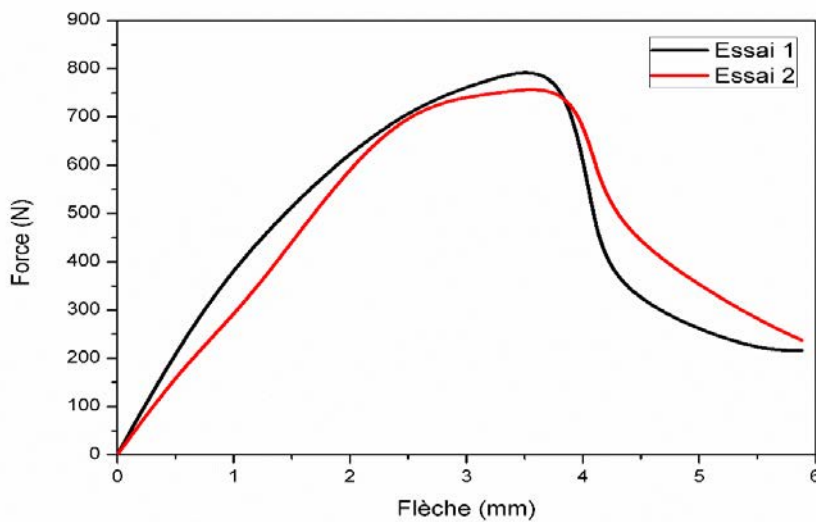


**Figure II. 22. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille de 4.07 mm de petite profondeur.**

### II.2.1.2.3. Eprouvettes de petites épaisseurs et entaille de 5.55 mm



**Figure II. 23. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille de 5.55 mm de grande**



**Figure II. 24. Représentations des forces en fonction de la flèche pour une éprouvette de petite épaisseur avec une entaille 5.55mm de petite profondeur.**

Enfin dans les deux dernières figure II.23 et II.24 la longueur de la flèche augmente aussi avec l'augmentation de la charge et le délaminage et la rupture de l'éprouvette avec une entaille de grande profondeur est beaucoup plus précoce que celle d'une éprouvette avec une entaille de petite profondeur.

Les résultats obtenus nous ramènent à déduire que :

- Le délaminage et la rupture d'une éprouvette entaillée est beaucoup plus précoce que celle d'une éprouvette sans entaille,



- L'augmentation de la taille des entailles rend l'éprouvette plus résistante à la rupture,
- L'augmentation de profondeur des entailles rend l'éprouvette moins résistante à la rupture.
- Lorsqu'on augmente les épaisseurs de notre éprouvette elle devient plus résistante aux délaminages et aussi aux ruptures.

## **Conclusion Générale**

La présente étude a été menée pour déterminer l'effet des imperfections géométriques sur un pipe en composite sandwich soumis à la flexion 3 points.

Pour les quatre cas de tests de flexion en trois points effectués sur des pipes en composite sandwich, la flèche augmente en augmentant les forces, en contrepartie elle augmente en augmentant les pressions, aussitôt, on remarque que la déflexion des éprouvettes de faibles épaisseurs est supérieure à celles des grandes épaisseurs.

# Table des 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 B Eng* 2016;91:176–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.053>.
- [2] Harte A-M, Fleck NA. Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion. *Acta Mater* 2000;48:1259–71. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00427-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00427-9).
- [3] White SC, Weaver PM, Wu KC. Post-buckling analyses of variable-stiffness composite cylinders in axial compression. *Compos Struct* 2015;123:190–203. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.013>.
- [4] Tafreshi A. Efficient modelling of delamination buckling in composite cylindrical shells under axial compression. *Compos Struct* 2004;64:511–20. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.050>.
- [5] J. Molimard. *mécanique des matériaux composite*. EMSE 2004. 2004.
- [6] Béakou A, Mohamed A. Influence of variable scattering on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites. *Compos Struct* 2001;53:287–93. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00012-5).
- [7] Berthelot J-M. *Mécanique des Matériaux et Structures Composites ISMANS Institut Supérieur des Matériaux Le Mans, France et Mécaniques Avancés*. n.d.
- [8] J.M. Berthelot. *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*. 4<sup>ème</sup> édition. 2005.
- [9] L. Merad. *Etude par spectroscopie raman et modélisation d'une résine composite rtm*. Université Paul Verlaine de Metz, 2010.
- [10] MAROUENE A. *Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test*. : Ecole Polytechnique de Montréal, 2010.
- [11] REYNE M. *Technologies des composites*. 3<sup>ème</sup> édition. Paris: 1998.
- [12] Achilles Petras. *Design of Sandwich Structures*. University Engineering Department, 1998.
- [13] N.KAOUCHE. *Prise en Compte Du Vieillissement et De L'endommagement Dans Le Dimensionnement De Structures En Matériaux Composites*. Mohamed Boudiaf, 2017.
- [14] A.CHERIF MOUAKI. *comportement mécanique d'un matériau composite sandwich*. Université Mohamed Kheider, 2017.
- [15] Chenine Halima. *Endommagement des Pipes en Matériaux Composites Stratifiés sous l'effet du Flambage*. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2022.