



**République Algérienne Démocratique et populaire**  
**Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté De Génie de la Construction**  
**Département Génie Mécanique**

## **Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Mécanique

**Spécialité** : construction mécanique

### **Thème**

**Évaluation de la capacité d'absorption  
d'énergie des structures tubulaires en  
acier inoxydable**

### **Présenté par :**

MERABTI Yousra

ZAIDI Dalia

Devant le Jury composé de :

|                     |                             |                   |       |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|-------|
| <b>Rapporteur :</b> | Mr. OULD OUALI Mohand       | <b>Professeur</b> | UMMTO |
| <b>President:</b>   | Mr. BEHTANI Amar            | <b>MC-A</b>       | UMMTO |
| <b>Examineur :</b>  | Mme. SI HADJ MOHAND Chafiaa | <b>MA-A</b>       | UMMTO |

**Promotion : 2023/2024**

# ***Dédicaces***

*À mes chers parents,*

*À ma mère, qui a toujours été là pour moi*

*À mon frère et ma sœur*

*À mes merveilles Lydia et Thamila,*

*Merci pour votre encouragement, votre rire contagieux et pour avoir  
été présentes à chaque étape de ce chemin,*

*À ma chère grand-mère, même si tu n'es plus parmi nous, ton amour  
et tes enseignements restent gravés dans mon cœur. Ce mémoire est  
dédié à ta mémoire et à l'impact profond que tu as eu sur ma vie,*

*Tu me manques énormément.*

***Yousra***

## *Dédicaces*

*À ma moitié, qui m'a toujours encouragé à donner le meilleur de moi-même et à devenir la meilleure version de moi-même.*

*À ma mère, qui m'a entouré d'un amour éternel.*

*À toi mon cher père, qui m'a entouré de tendresse tout au long de ma vie, à celui qui m'a inspiré la volonté et la motivation pour découvrir et comprendre le monde.*

*A mes frères MARZOUK et sa femme ZAHRA, AMMAR et mon bras droit GHANEM.*

*A ma sœur LAMIA et son époux MEZIANE*

*A CHAHRAZAD, NABIL, LIDIA et ILIA*

*A mes amies HANANE ZAMOUM, SAMIRA TARMOUL ET SOUHILA MOKHTARI, HALLAL TAOUS, CHERIEF MELISSA*

*A AGHILES BOURAHLA et REGUIG JUBA.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude à tous mes enseignants, qu'ils soient hommes ou femmes, qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours académique, aussi de m'avoir guidé depuis ma première année de primaire jusqu'à la dernière.*

*Et à tous mes collègues de la promotion*

*2024*

*DALIA*

# *Remerciements*

*Louange à ALLAH qui nous a guidé vers la quête du savoir*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers M. OULD OUALI Mohand*

*Notre encadrant de mémoire, pour ses précieuses directives et son soutien constant tout au long de notre travail. Nous sommes honorés de collaborer avec lui et nous sommes reconnaissantes pour cette expérience enrichissante.*

*Nous tenons à remercier les ingénieurs de hall technologique :*

*Mr. MEGHLAT Ahcen, Mr.SADOUDI,*

*Nous adressons nos sincères remerciements à Mr.ARIBI Chouib et l'ensemble de l'unité de recherche MPE (matériaux productique et environnement)*

*Nous sommes profondément reconnaissantes envers les membres de jury, dont la présence et les évaluations valoriseront la soutenance de ce mémoire.*

*Enfin, nous remercions nos enseignants de génie mécaniques pour leur soutien inestimable et leurs conseils éclairés tout au long de notre carrière académique.*

*MERABTI Yousra*

*ZAIDI Dalia*

# Table des matières

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Dédicaces1.....            | i    |
| Dédicaces2.....            | ii   |
| Remerciement.....          | iii  |
| Listes des figures.....    | iv   |
| Listes des tableaux.....   | xiii |
| Introduction Générale..... | 1    |

## **Chapitre I : Etat de l'art**

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.1 Introduction.....</b>                                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>I.2 Généralités sur les matériaux .....</b>                                                               | <b>3</b>  |
| I.2.1 Les types .....                                                                                        | 3         |
| I.2.2 Les degrés de symétrie des matériaux .....                                                             | 4         |
| I.2.3 Les caractéristiques des matériaux métalliques :.....                                                  | 6         |
| <b>I.3 Les aciers : .....</b>                                                                                | <b>7</b>  |
| I.3.1 Types d'aciers :.....                                                                                  | 7         |
| <b>I.4 Acier inoxydable .....</b>                                                                            | <b>9</b>  |
| I.4.1 Définition.....                                                                                        | 9         |
| I.4.2 Types des aciers inoxydables .....                                                                     | 9         |
| I.4.3 les Propriétés mécaniques des aciers inoxydables .....                                                 | 10        |
| I.4.4 Domaines d'utilisation des aciers inoxydable .....                                                     | 10        |
| <b>I.5 Systèmes d'absorption d'énergie .....</b>                                                             | <b>11</b> |
| I.5.1 Description générale des systèmes d'absorption d'énergie des matériaux .....                           | 11        |
| I.5.2 Matériaux Stratégiques pour l'Absorption d'Énergie : Caractéristiques, Mécanismes et Applications..... | 11        |
| I.5.2.1 Les systèmes d'absorption d'énergie des matériaux métalliques.....                                   | 12        |
| <b>I.6 Généralités sur les principaux mécanismes d'absorption d'énergie .....</b>                            | <b>14</b> |
| I.6.1 Dissipation d'énergie par déformation élastique .....                                                  | 14        |
| I.6.1.1 Fondements et mécanismes de déformation élastique .....                                              | 15        |
| I.6.2 Systèmes conventionnels d'absorption d'énergie par déformation plastique.....                          | 17        |
| I.6.3 Absorption d'énergie via la déformation plastique des structures tubulaires cylindriques en acier..... | 18        |
| I.6.4 Phénomène de flambage des structures tubulaires .....                                                  | 18        |
| I.6.4.1 Différents types de flambage .....                                                                   | 18        |
| I.6.4.3 Flambages des structures tubulaires sous sollicitation radiale .....                                 | 19        |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.6.5 Ecrasement de structures tubulaires sous chargement axial .....</b> | <b>21</b> |
| <b>I.6.5.1 Déformation progressive des tubes .....</b>                       | <b>21</b> |
| <b>I.6.5.2 Inversion des tubes .....</b>                                     | <b>23</b> |
| <b>I.6.5.3 Aplatissement des tubes .....</b>                                 | <b>23</b> |
| <b>I.7 Mécanisme de détérioration des structures en forme de tube .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>I.8 Mode d'écrasement .....</b>                                           | <b>24</b> |
| <b>I.9 Conclusion .....</b>                                                  | <b>25</b> |

## **Chapitre II : Étude expérimentale**

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II.1 Introduction .....</b>                          | <b>26</b> |
| <b>II.2 Les essais mécaniques .....</b>                 | <b>26</b> |
| <b>II.3 L'intérêt des essais .....</b>                  | <b>26</b> |
| <b>II.4 Essai de traction .....</b>                     | <b>27</b> |
| <b>II.4.1 Définition .....</b>                          | <b>27</b> |
| <b>II.4.2 Principe de l'essai .....</b>                 | <b>27</b> |
| <b>II.4.3 Eprouvettes .....</b>                         | <b>28</b> |
| <b>II.4.4 propriétés tirées de l'essai.....</b>         | <b>28</b> |
| <b>II.4.5 Résultats d'un essai de traction .....</b>    | <b>30</b> |
| <b>II.5 Essai de compression .....</b>                  | <b>32</b> |
| <b>II.5.1 définition .....</b>                          | <b>32</b> |
| <b>II.5.2 Objectifs de l'essai .....</b>                | <b>33</b> |
| <b>II.5.3 Principe de l'essai .....</b>                 | <b>33</b> |
| <b>II.5.4 Eprouvettes .....</b>                         | <b>33</b> |
| <b>II.5.5 Résultats d'un essai de compression .....</b> | <b>34</b> |
| <b>II.6 Essai de flexion .....</b>                      | <b>35</b> |
| <b>II.6.1 Définition .....</b>                          | <b>35</b> |
| <b>II.6.2 Principe de l'essai .....</b>                 | <b>36</b> |
| <b>II.6.3 Eprouvettes .....</b>                         | <b>36</b> |
| <b>II.6.5 Résultat de l'essai .....</b>                 | <b>37</b> |
| <b>II.6.6 Résultats de l'essai.....</b>                 | <b>37</b> |
| <b>II.7 Relation entre les essais mécaniques .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>II.8 Essai de résilience .....</b>                   | <b>38</b> |
| <b>II.8.1 Définition .....</b>                          | <b>38</b> |

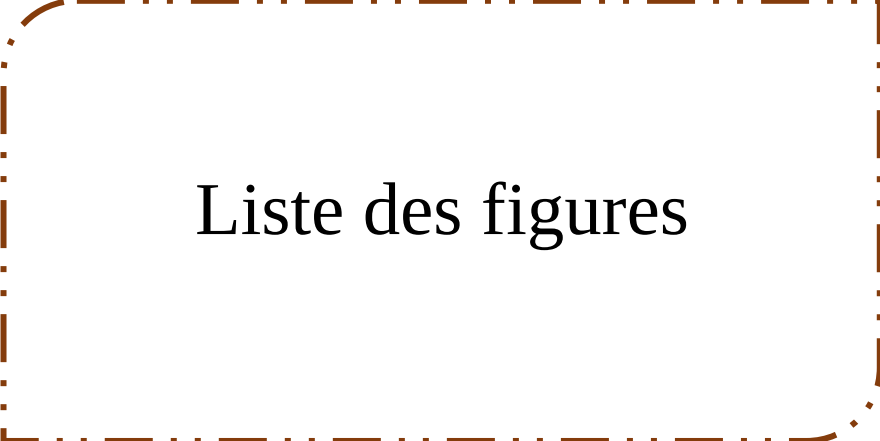
|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| II.8.2 La déférence entre essai Charpy et Izood :           | 39 |
| II.8.3 Objectifs de l'essais.....                           | 39 |
| II.8.4 Principe de l'essai (essai Charpy) .....             | 40 |
| II.8.5 Eprouvettes .....                                    | 41 |
| II.8.6 Effet de température sur l'essai de résilience ..... | 41 |
| II.9La ténacité .....                                       | 42 |
| II.9.1 Définition .....                                     | 42 |
| II.9.2 Objectifs de l'essais.....                           | 43 |
| II.9.3 Principe de l'essai .....                            | 44 |
| II .9.4 Éprouvettes .....                                   | 45 |
| II.10 La relation entre la résilience et la ténacité.....   | 45 |
| II.11 Phénomène d'écrouissage .....                         | 46 |
| II.11.1 Définition. ....                                    | 46 |
| II.11.2 Courbe et coefficient d'écrouissage .....           | 46 |
| II.12 Matériaux étudiés.....                                | 48 |
| II.12.1 caractéristiques des tubes .....                    | 48 |
| II.13 Méthodes expérimentales.....                          | 48 |
| II.13.1 Préparation des éprouvettes .....                   | 48 |
| II.13.2 L'essai de compression.....                         | 50 |
| II.13.3 Résultats expérimentaux.....                        | 51 |
| II.13.4 Comparaisons entre les résultats .....              | 56 |
| II.14 calculs des perçages.....                             | 56 |
| II.15 Conclusion.....                                       | 61 |

### Chapitre III : Simulations et résultats

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| II.1Introduction.....                                                 | 62 |
| III.2 Présentation de logiciel Abaqus.....                            | 62 |
| III .2.1 Les composants de Abaqus.....                                | 62 |
| III.2.2 Les éléments utilisés dans ABAQUS .....                       | 62 |
| III.2.3 Les modules .....                                             | 63 |
| III.3 Etude de la convergence du maillage .....                       | 63 |
| III.3.1 Optimisation de la taille globale du maillage .....           | 63 |
| III .3.2 Influence du nombre d'élément sur l'épaisseur.....           | 70 |
| III.4 La troisième partie : écrasement axial des tubes perforés. .... | 73 |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.4.1 Les trous.....</b>                                             | <b>73</b> |
| <b>III.4.1.1 Les éprouvettes à deux trous (2 faces / 1 ligne) .....</b>   | <b>73</b> |
| <b>III.4.1.2 Les éprouvettes à quatre trous (2 faces / 2lignes) .....</b> | <b>74</b> |
| <b>III.4.1.3 Les éprouvettes à quatre trous (4 faces/ 1ligne).....</b>    | <b>75</b> |
| <b>III.4.1.4 Les éprouvettes à huit trous (4faces /2lignes).....</b>      | <b>76</b> |
| <b>III.4.2 Les ellipses.....</b>                                          | <b>78</b> |
| <b>III.4.2.1 Les ellipses verticales .....</b>                            | <b>78</b> |
| <b>III.4.2.1.1 Deux ellipses (2 faces / 1ligne) .....</b>                 | <b>78</b> |
| <b>III.4.2.1.2 Quatre ellipses (2faces /2 lignes).....</b>                | <b>79</b> |
| <b>III.4.2.1.3 Quatre ellipses (4 faces /1ligne) .....</b>                | <b>80</b> |
| <b>III.4.2.1.4 huit ellipses (4 faces/ 2 lignes).....</b>                 | <b>81</b> |
| <b>III.4.2.2 Les ellipses horizontalement.....</b>                        | <b>83</b> |
| <b>III.4.2.2.1 Deux ellipses (2 faces / 1ligne) .....</b>                 | <b>83</b> |
| <b>III.4.2.2.2 Quatre ellipses (2 faces /2ligne) .....</b>                | <b>84</b> |
| <b>III.4.2.2.3 Quatre ellipses (4 faces/1 ligne) .....</b>                | <b>85</b> |
| <b>III.4.2.2.4 Huit ellipses (4 faces/ 2 lignes) .....</b>                | <b>85</b> |
| <b>III .4.2.3 Les ellipses inclinées .....</b>                            | <b>87</b> |
| <b>III .4.2.3.1 Deux ellipses (2 faces/1 ligne).....</b>                  | <b>87</b> |
| <b>III .4.2.3.2 Quatre ellipses (2 faces/2 ligne) .....</b>               | <b>88</b> |
| <b>III .4.2.3.3 Quatre ellipses (4 faces/1 ligne) .....</b>               | <b>88</b> |
| <b>III .4.2.3.4 Huit ellipses (4faces/2 lignes) .....</b>                 | <b>89</b> |
| <b>III.4.3 Les rainures .....</b>                                         | <b>91</b> |
| <b>III.4.3.1 Les rainures verticales .....</b>                            | <b>91</b> |
| <b>III.4.3.1.1 Deux rainures à (2 faces /1ligne) .....</b>                | <b>91</b> |
| <b>III.4.3.1.2 Quatre rainures à(4faces/1ligne).....</b>                  | <b>92</b> |
| <b>III.4.3.1.3 Quatre rainures à (2faces/2lignes) .....</b>               | <b>93</b> |
| <b>III.4.3.1.4 Huit rainures à (4faces/2lignes).....</b>                  | <b>93</b> |
| <b>III.4.3.2 Rainures horizontales.....</b>                               | <b>95</b> |
| <b>III.4.3.2.1 Deux Rainures à (2faces/1ligne) .....</b>                  | <b>95</b> |
| <b>III.4.3.2.2 Quatre rainures à (2faces/2lignes) .....</b>               | <b>96</b> |
| <b>III.4.3.2.3 Quatre rainures à (4faces/1ligne).....</b>                 | <b>96</b> |
| <b>III.4.3.2.4 Huit rainures à (4faces/2lignes).....</b>                  | <b>97</b> |
| <b>III.4.3.3 Les rainures inclinées .....</b>                             | <b>99</b> |

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| III.4.3.3.1 Deux rainures inclinées (2 faces/1 ligne) .....       | 99   |
| III.4.3.3.2 Quatre rainures inclinées (2 faces/2 ligne).....      | 100  |
| III.4.3.3.3 Quatre rainures inclinées (4 faces/1 ligne).....      | 100  |
| III.4.3.3.4 Huit rainures inclinées (4 faces/2 lignes).....       | 101  |
| III.5 Comparaison entre les résultats obtenus .....               | 103  |
| III.5.1 Comparaison entre les courbes de différentes formes ..... | 103  |
| III.6 Ecrasement des tubes sous chargement dynamique .....        | 104  |
| III.6.1 Tubes non-perforés .....                                  | 104  |
| III.6.2 Tubes perforé .....                                       | 105  |
| Cas 1 : cercles.....                                              | 105  |
| Cas 2 : Ellipses .....                                            | 105  |
| Cas 3 : Rainures.....                                             | 106  |
| III.6 Conclusion .....                                            | 107  |
| Conclusion Générale .....                                         | 108  |
| Références bibliographiques. ....                                 | 109  |
| Résumé. ....                                                      | xiii |



# Liste des figures

## Chapitre I : Etat de l'art.

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Matériau anisotrope.....                                                                                          | 4  |
| <b>Figure I.2 :</b> Matériau isotrope .....                                                                                           | 4  |
| <b>Figure I.3:</b> Matériau isotrope transverse .....                                                                                 | 5  |
| <b>Figure I.4:</b> matériau orthotrope .....                                                                                          | 5  |
| <b>Figure I.5:</b> tubes en acier.....                                                                                                | 7  |
| <b>Figure I.6:</b> aciers inoxydables .....                                                                                           | 9  |
| <b>Figure I.7:</b> tube métallique avant et après déformation .....                                                                   | 12 |
| <b>Figure I.8 :</b> Courbe force déplacement typique de compression uni-axial. ....                                                   | 13 |
| <b>Figure I.9 :</b> Zones de déformations (la diffusion des forces lors d'un impact frontal).....                                     | 15 |
| <b>Figure I.10 :</b> un dispositif de sécurité passive standards d'une voiture airbag .....                                           | 16 |
| <b>Figure I.11:</b> Réaction d'une structure face à la déformation horizontale du terrain.....                                        | 17 |
| <b>Figure I.12 :</b> flambement divers et Autres formes d'instabilités .....                                                          | 19 |
| <b>Figure I.13 :</b> tube déformé sous chargement latéral localisé .....                                                              | 20 |
| <b>Figure I.14 :</b> Essai de compression latérale du tube unique : (a) – éprouvette avant chargement,<br>(b) – mode de rupture. .... | 21 |
| <b>Figure I.15 :</b> Essai de compression axial d'un tube .....                                                                       | 21 |
| <b>Figure I.16 :</b> Diverses méthodes de déformation des structures tubulaires soumises à un<br>écrasement axial .....               | 22 |
| <b>Figure I.17 :</b> Mode de dégradation de la structure tubulaire.....                                                               | 24 |
| <b>Figure I.18 :</b> mode d'écrasement stable « a » et instable « b » .....                                                           | 25 |
| <b>Figure I.19 :</b> courbe caractéristique des deux modes d'écrasement stable « a » et instable « b »<br>.....                       | 25 |

## Chapitre II : étude expérimentale.

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.1:</b> Illustration de l'essai de traction : machine, éprouvette et évolution pendant l'essai.<br>..... | 27 |
| <b>Figure II.2 :</b> Éprouvette de traction : a) de forme cylindrique, b) de forme prismatique.                      | 28 |
| <b>Figure II.3:</b> courbe de traction. ....                                                                         | 31 |
| <b>Figure II.4 :</b> la hauteur des éprouvettes d'un essai de compression. ....                                      | 34 |
| <b>Figure II.5 :</b> Courbe d'essai de compression d'un tube. ....                                                   | 34 |
| <b>Figure II.6 :</b> diagramme de contrainte allongement.....                                                        | 35 |
| <b>Figure II.7:</b> essai mécanique de flexion. ....                                                                 | 36 |
| <b>Figure II.8 :</b> exemple d'une poutre cylindrique en flexion. ....                                               | 37 |
| <b>Figure II.9 :</b> Expérience d'essai de Charpy. ....                                                              | 40 |
| <b>Figure II.10:</b> les deux types d'éprouvettes.....                                                               | 41 |
| <b>Figure II.11:</b> courbe de transition de la résilience. ....                                                     | 42 |
| <b>Figure II.12:</b> les modes de fissuration élémentaires .....                                                     | 43 |
| <b>Figure II.13:</b> courbe de contrainte-déformation.....                                                           | 44 |
| <b>Figure II.14:</b> éprouvette pré-fissurée .....                                                                   | 45 |
| <b>Figure II.15:</b> phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction. ....                            | 46 |
| <b>Figure II.16 :</b> Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques .....                             | 47 |
| <b>Figure II.17 :</b> Géométrie et dimension de l'éprouvette utilisée dans l'essai de compression .                  | 48 |
| <b>Figure II.18 :</b> les trois éprouvettes découpées. ....                                                          | 49 |
| <b>Figure II.19 :</b> dressage des surfaces brutes à l'aide d'un tour. ....                                          | 49 |
| <b>Figure II.20:</b> machine et logiciel Zwick/Roell.....                                                            | 50 |
| <b>Figure II.21:</b> Les échantillons après l'essai de compression. ....                                             | 51 |
| <b>Figure II.22 :</b> Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 120mm après déformation.<br>.....            | 53 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.23:</b> Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 80mm après déformation.                  | 53 |
| <b>Figure II.24:</b> courbe contrainte-déformation d'essai 1 tube 80 mm après déformation. ....                 | 54 |
| <b>Figure II.25:</b> Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 100mm après déformation.                 | 54 |
| <b>Figure II.26:</b> courbe contrainte-déformation d'essai 1 tube 100mm après déformation. ....                 | 55 |
| <b>Figure II.27:</b> Comparaison courbe contrainte-déformation choisies des éprouvettes après déformation. .... | 56 |

### **Chapitre III : Simulations et résultats.**

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FigureIII.1 :</b> Module part des corps. ....                                                                | 64 |
| <b>Figure III.2 :</b> Ensemble (tube-disque). ....                                                              | 64 |
| <b>Figure III. 3 :</b> le maillage de l'ensemble.....                                                           | 65 |
| <b>Figure III.4 :</b> visualisation de tube après déformation.....                                              | 66 |
| <b>Figure III.5 :</b> courbe force-déplacement obtenue. ....                                                    | 66 |
| <b>Figure III.6 :</b> déformation de profile des tubes pour les différentes tailles de maillage. ....           | 69 |
| <b>Figure III.7 :</b> comparaison des courbes force-déplacement des différents maillages.....                   | 69 |
| <b>Figure III.8 :</b> « 3 » couches d'éléments selon l'épaisseur. ....                                          | 70 |
| <b>Figure III .9 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur « 3 » couches d'éléments selon l'épaisseur..... | 70 |
| <b>Figure III.10 :</b> « 4 » couches d'éléments selon l'épaisseur. ....                                         | 70 |
| <b>Figure III.11:</b> Contour des contraintes de Von mises sur « 4 » couches d'éléments selon l'épaisseur.....  | 71 |
| <b>Figure III.12:</b> « 5 » couches d'éléments selon l'épaisseur. ....                                          | 71 |
| <b>Figure III.13:</b> Contour des contraintes de Von mises sur « 5 » couches d'éléments selon l'épaisseur.....  | 71 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.14:</b> Comparaison des courbes force-déplacement expérimentale avec celles numériques de l'épaisseur « 3,4,5 ». .....     | 72 |
| <b>Figure III.15 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 trous.....                                                    | 73 |
| <b>Figure III.16 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette a la fin de chargement .....                                | 73 |
| <b>Figure III.17 :</b> vue schématique l'expérience des éprouvettes à 04 trous. ....                                                     | 74 |
| <b>FigureIII.18 :</b> Distribution des contraintes de von mises des échantillons 4 trous.....                                            | 74 |
| <b>Figure III.19 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 trous.....                                                    | 75 |
| <b>Figure III.20:</b> Distribution des contraintes de von mises des échantillons à quatre trous (4 faces/ 1ligne).....                   | 75 |
| <b>Figure III.21 :</b> Géométrie et maillage du tube perforé avec 8 trous. ....                                                          | 76 |
| <b>Figure III.22:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 8 trous (2trous 4 faces) après le chargement axial. ....     | 76 |
| <b>Figure III.23:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme de cercle. ....                           | 77 |
| <b>Figure III.24:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses.....                                                  | 78 |
| <b>Figure III.25 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses après le chargement axial. ....                  | 78 |
| <b>Figure III.26 :</b> Géométrie et maillage de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses.....                                           | 78 |
| <b>Figure III.27:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses après le chargement axial. ....                   | 78 |
| <b>Figure III.28:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses (1 ellipse 4 faces). .....                            | 80 |
| <b>Figure III.29:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses (1ellipse 4 faces) après le chargement axial..... | 80 |
| <b>Figure III.30:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8 ellipses. ....                                                 | 81 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.31:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 8 ellipses après le chargement axial. ....                                | 81 |
| <b>Figure III.32:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses verticales.....                           | 82 |
| <b>Figure III.33 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses horizontales. ..                                                  | 83 |
| <b>Figure III.34:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses horizontale après le chargement axial. ....                    | 83 |
| <b>Figure III.35 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses horizontales (2 faces/2lignes).....                               | 84 |
| <b>Figure III.36 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses horizontales (2faces/2lignes) après le chargement axial.....  | 84 |
| <b>Figure III.37 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 04 ellipses horizontales (4faces/1lignes) après le chargement axial..... | 85 |
| <b>Figure III.38:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 04 ellipses horizontales (4faces/1ligne) après le chargement axial. ....  | 85 |
| <b>Figure III.39 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8ellipses horizontales (4 faces/2lignes).....                                | 85 |
| <b>Figure III.40 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses horizontales (4faces/2lignes) après le chargement axial.....  | 86 |
| <b>Figure III.41 :</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses horizontales. ....                       | 86 |
| <b>Figure III.42:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses inclinées (2 faces/1ligne). ....                                   | 87 |
| <b>Figure III.43 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses inclinées (2faces/1ligne) après le chargement axial. ....     | 87 |
| <b>Figure III.44 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses inclinées (2 faces/2ligne). ....                                  | 88 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.45 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (2faces/2ligne) après le chargement axial. ....  | 88 |
| <b>Figure III.46 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses inclinées (4faces/ligne).....                                  | 88 |
| <b>Figure III.47:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (4faces/1 ligne) après le chargement axial. ....  | 89 |
| <b>Figure III.48 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8 ellipses inclinées (4faces/2ligne). ....                                | 89 |
| <b>Figure III.49 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (4faces/2 lignes) après le chargement axial..... | 89 |
| <b>Figure III. 50 :</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses inclinées.....                       | 91 |
| <b>Figure III.51 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (2 faces/1ligne). ....                                        | 91 |
| <b>Figure III.52 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (2faces/1ligne) après le chargement axial. ....         | 92 |
| <b>Figure III.53 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (4faces/1ligne). ....                                         | 92 |
| <b>Figure III.54:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (4faces/1ligne) après le chargement axial. ....          | 92 |
| <b>Figure III.55:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (2faces/2ligne). ....                                          | 93 |
| <b>Figure III.56:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (2faces/2ligne) après le chargement axial. ....          | 93 |
| <b>Figure III.57:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (4faces/2ligne). ....                                          | 93 |
| <b>Figure III.58:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (4faces/2lignes) après le chargement axial.....          | 94 |

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure III.59:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des rainures. ....                                           | 94  |
| <b>Figure III.60:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (2faces/1ligne). ....                                      | 95  |
| <b>Figure III.61:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures horizontales à (2faces/1ligne) après le chargement axial. ....      | 95  |
| <b>Figure III.62 :</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (2faces/2ligne). ....                                     | 96  |
| <b>Figure III.63:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures horizontales à (2faces/2lignes) après le chargement axial. ....     | 96  |
| <b>Figure III.64:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (4faces/1ligne). ....                                      | 96  |
| <b>Figure III.65:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures horizontales à (4faces/1ligne) après le chargement axial ....       | 97  |
| <b>Figure III.66:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 08 rainures horizontales à (4faces/2lignes). ....                                  | 97  |
| <b>Figure III.67 :</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 08 rainures horizontales à (4faces/2lignes) après le chargement axial. .... | 97  |
| <b>Figure III.68:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des rainures horizontales. ....                              | 98  |
| <b>Figure III.69:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures inclinées à (2faces/1ligne). ....                                         | 99  |
| <b>Figure III.70:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (2faces/1ligne) après le chargement axial. ....                   | 99  |
| <b>Figure III.71:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 04 rainures inclinées à (2faces/2ligne). ....                                      | 100 |
| <b>Figure III.72:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 04 rainures inclinées à (2faces/2lignes) après le chargement axial. ....     | 100 |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure III.73:</b> vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 04 rainures inclinées à (4faces/1ligne).....                                                 | 100 |
| <b>Figure III.74:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 04 rainures inclinées à (4faces/1ligne) après le chargement axial. ....                | 101 |
| <b>Figure III.75:</b> : vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 08 rainures inclinées à (4faces/2ligne).....                                               | 101 |
| <b>Figure III.76:</b> Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 08 rainures inclinées à (4faces/2ligne) après le chargement axial. ....                | 101 |
| <b>Figure III.77:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé par des rainures inclinées avec la courbe force-déplacement expérimentale. .... | 102 |
| <b>Figure III.78:</b> comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en différentes formes.....                                                      | 103 |
| <b>Figure III.79:</b> les courbes de la dynamique des tubes non-perforés. ....                                                                                        | 104 |
| <b>Figure III.80 :</b> les courbes de la dynamique des tubes perforés avec cercles. ....                                                                              | 105 |
| <b>Figure III.81 :</b> les courbes de la dynamique des tubes perforés avec ellipses. ....                                                                             | 105 |
| <b>Figure III.82 :</b> les courbes de la dynamique des tubes perforés avec ellipses. ....                                                                             | 106 |



## Liste des tableaux

## **Chapitre I : Etat de l'art.**

|                                                                 |          |
|-----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Tableau I.1 : les types d'aciers faiblement alliés .....</b> | <b>8</b> |
|-----------------------------------------------------------------|----------|

## **Chapitre II : étude expérimentale.**

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau II.1 : la comparaison entre l'essai Charpy et l'essai Izood .....</b>                       | <b>39</b> |
| <b>Tableau II.2 : les résultats de calcule pour la forme cercle .....</b>                              | <b>58</b> |
| <b>Tableau II.2: les résultats de calcule pour la forme de l'ellipse allongé verticalement.....</b>    | <b>58</b> |
| <b>Tableau II. 4 : les résultats de calcule pour la forme de l'ellipse allongé horizontalement ...</b> | <b>59</b> |
| <b>Tableau II. 5 : les résultats de calcule pour la forme de rainures verticalement .....</b>          | <b>60</b> |
| <b>Tableau II.6 : les résultats de calcule pour la forme de rainures horizontalement .....</b>         | <b>60</b> |

# Introduction Générale

## Introduction Générale

---

Dans le domaine de l'ingénierie des structures, l'évaluation de la capacité d'absorption d'énergie des matériaux joue un rôle critique lors de la conception des produits (véhicules, ...). Parmi les systèmes d'absorption d'énergie, les structures tubulaires possèdent une grande capacité à absorber et dissiper l'énergie lors d'impacts ou d'accidents. Ces structures jouent un rôle essentiel pour assurer la sécurité des passagers et minimiser les dommages matériels. Cependant, les matériaux utilisés dans ces applications doivent être rigoureusement évalués, notamment leur résilience et leur capacité de déformation contrôlée sous contrainte. Face à des scénarios de chocs, comme des collisions, ces matériaux doivent non seulement résister aux forces extrêmes mais aussi redistribuer l'énergie cinétique de manière efficace afin de réduire les impacts sur les occupants et sur la structure elle-même. L'amélioration continue de la capacité d'absorption d'énergie des structures tubulaires implique une combinaison sophistiquée des matériaux et de la conception de ces structures. Des formes sont fréquemment employées pour maximiser la performance des structures tout en minimisant leur poids et leur encombrement.

Ce mémoire se concentre sur une approche intégrée visant à évaluer et à améliorer la capacité d'absorption d'énergie des structures tubulaires en acier inoxydable à travers une combinaison d'analyse théorique avancée, des simulations numériques et des essais expérimentaux de caractérisation. Cette étude cherche à définir des méthodes de modélisation précises pour prédire le comportement des matériaux sous différentes conditions de charge.

Nous présentons donc un travail sur l'évaluation de la capacité d'absorption d'énergie des structures tubulaires en acier inoxydable. Notre intérêt pour ce sujet découle de notre désir de comprendre comment ces matériaux résistent aux impacts et aux charges extrêmes dans divers environnements industriels. Cette étude permettra, nous l'espérons, d'ouvrir de nouvelles voies vers des applications plus sûres et plus efficaces dans le secteur industriel.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous avons effectué des rappels théoriques sur les métaux et les propriétés mécaniques des aciers. Nous avons aussi réalisé une synthèse des mécanismes d'absorption d'énergie utilisés dans la pratique. Cette étude bibliographique a posé les bases nécessaires à notre étude.

**Le deuxième chapitre** est consacré à une étude pratique où nous avons réalisé des essais expérimentaux de caractérisation. Les résultats de ces essais ont non seulement approfondi nos connaissances théoriques mais ils ont également fourni des données réelles du comportement

## Introduction Générale

---

de ces tubes. Par la suite ses données ont été exploitées lors de l'évaluation des performances de ces structures.

Enfin, **le dernier chapitre** a exploré les possibilités offertes par la simulation numérique. Nous avons utilisé le code de calcul Abaqus pour prédire le comportement le comportement des tubes en exploitant les données des essais de caractérisation que nous avons validées en comparaison avec les résultats expérimentaux. Par la suite, les simulations ont permis de tester différentes configurations dans le but d'optimiser ces structures.

*Chapitre I :*

*Etat de l'art*

## **I.1 Introduction**

Ce chapitre est devisé en deux parties, la première donne un rappel général sur les aciers plus particulièrement l'acier inoxydable. La deuxième partie s'intéresse aux différents systèmes d'absorption d'énergie.

## **I.2 Généralités sur les matériaux**

Les ingénieurs fabriquent des objets. À partir des matériaux selon l'application souhaité. Ces matériaux doivent notamment être capables de supporter des charges mécaniques. Donc ce n'est pas un matériau qui est rechercher plutôt mais un certain profil de propriétés.

### **➤ Les matériaux**

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme utilise pour : fabriquer des objets, construire des bâtiments ou des machines, transports, l'outillage, les ustensiles de cuisine, l'électricité, l'électronique. Parmi les matériaux, les métaux occupent une grande place dans l'industrie.

Les matériaux sont différenciés selon leur provenance (issus d'êtres vivants par exemple) et leurs propriétés, qu'elles soient mécaniques (flexibilité ou rigidité...), chimiques (perméabilité ou imperméabilité à l'eau...) ou encore physiques (conductivité de l'électricité ou de la chaleur...) [1].

### **I.2.1 Les types [1] :**

- **Les matériaux organiques** : est un matériau qui contient du carbone et provient d'être vivants, qu'ils soient d'origine végétale (bois, papier...), ou animale (cuir, laine). Les matériaux organiques sont utilisés pour divers objets en raison de leurs caractéristiques telles que leur légèreté ou leur élasticité.
- **Les matériaux minéraux ou inorganiques** : est une substance d'origine minérale qui ne possède pas de structure moléculaire à base de carbone (roche, céramique, verre).
- **Les matériaux plastiques(synthétique)** : qui en général proviennent de combustibles dits fossiles se trouvant dans le sol, comme le pétrole par exemple.
- **Les matériaux composites** : est une combinaison (assemblage) de deux matériaux distincts que l'on appelle généralement la matrice et le renfort, aux propriétés souvent complémentaires, (exemple : fibre de carbone, fibre végétale).

- **Les matériaux métalliques** : sont des matériaux dont les atomes sont unis par des liaisons métalliques. Il s'agit de corps simples ou d'alliages le plus souvent durs, opaques, brillants, bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. (Fer, cuivre, bronze ; et les alliages métalliques : **acier inoxydable**).

**I.2.2 Les degrés de symétrie des matériaux** : les matériaux présentent y différents degrés de symétrie [2],[3] :

**a) Matériau anisotrope** : appelé aussi matériau triclinique n'a aucune propriété de Symétrie, C'est-à-dire ces propriétés varient en fonction de la direction.

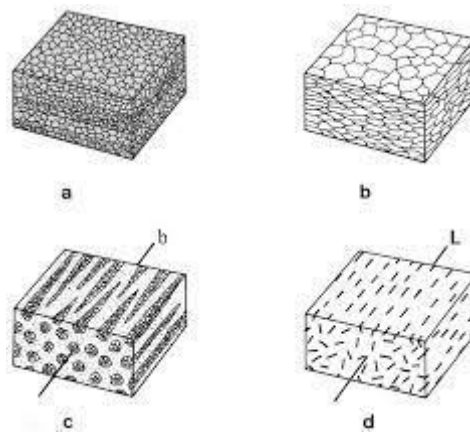


**Figure I.1** : Matériau anisotrope.

**b) Matériau isotrope** : c'est un matériau qui présente les mêmes propriétés dans toutes les directions. Ou bien sont des matériaux invariants quel que soit le changement de repère, donc toutes les directions sont identiques.

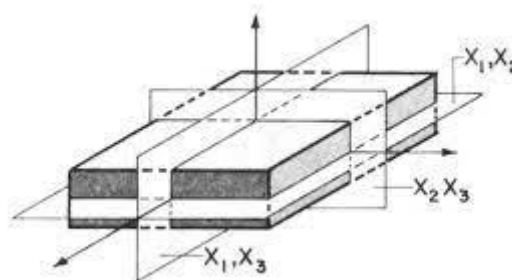


**Figure I.2** : Matériau isotrope.

**c) Matériau isotrope transverse (unidirectionnel) :** C'est un matériau orthotrope qui présente une direction ou un plan particulier. Dans ce plan les propriétés isotropes. C'est-à-dire les propriétés suivantes ces deux axes sont identique.

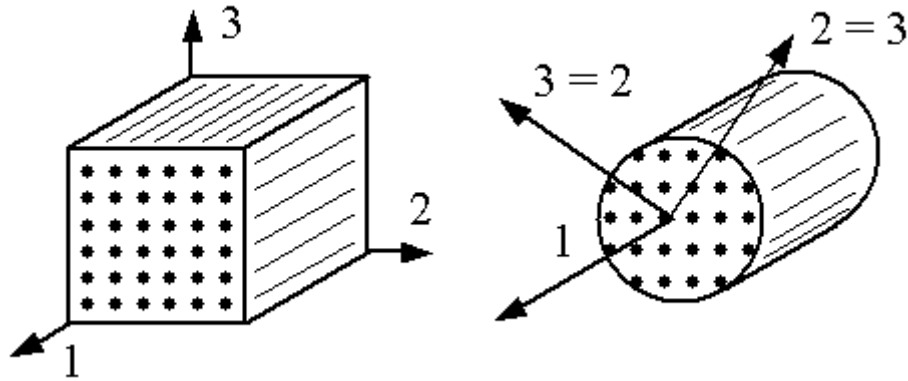


**Figure I.3:** Matériau isotrope transverse.

**d) matériau orthotrope :** est un matériau qui se caractérise par la présence de trois plans de symétrie, chacun étant perpendiculaire aux deux autres. La présence de deux plans de symétrie perpendiculaires implique l'existence du troisième plan.

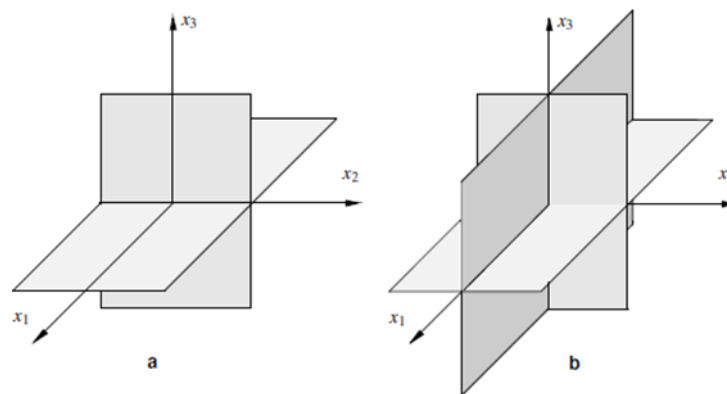


**Figure I.4:** matériau orthotrope.

**I.2.3 Les caractéristiques des matériaux métalliques :**

Les matériaux métalliques se distinguent par plusieurs caractéristiques fondamentales qui les rendent essentiels dans divers domaines industriels.

Premièrement, leur capacité à conduire l'électricité et la chaleur résulte de la mobilité des électrons dans leur structure cristalline. Cette conductivité électrique et thermique est une propriété clé exploitée dans de nombreuses applications, notamment dans l'industrie électrique, électronique et énergétique.

Deuxièmement, la malléabilité et la ductilité des métaux les rendent facilement formables sous diverses conditions de traitement mécanique, tels que le laminage, le forgeage et l'extrusion. Ces propriétés permettent la fabrication de pièces complexes et la création de structures métalliques adaptées à un large éventail d'applications.

Troisièmement, la brillance métallique caractéristique des surfaces métalliques est due à leur capacité à réfléchir la lumière, ce qui est souvent exploité dans des applications esthétiques et décoratives, ainsi que dans des applications optiques et d'éclairage.

Quatrièmement, les propriétés de dureté des métaux varient considérablement en fonction de leur composition chimique et de leur structure cristalline. Certains métaux sont relativement mous et faciles à façonner, tandis que d'autres sont extrêmement durs et résistants à l'usure, ce qui les rend adaptés à des applications telles que les outils de coupe et les pièces soumises à des contraintes mécaniques élevées.

Cinquièmement, la résistance à la corrosion est une propriété cruciale pour de nombreux métaux, et elle peut être améliorée par des méthodes telles que le placage, le revêtement et l'utilisation d'alliages spécifiques. Cette résistance à la corrosion permet d'utiliser les métaux dans des environnements agressifs tout en assurant leur durabilité et leur longévité.

Enfin, les métaux ont généralement des points de fusion élevés, ce qui les rend adaptés à des applications à haute température, telles que les moteurs, les turbines et les applications aérospatiales [4].

### I.3 Les aciers :

L'acier est un matériau essentiel dans de nombreux domaines industriels en raison de ses propriétés uniques et de sa polyvalence. Il s'agit d'un alliage métallique principalement composé de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone). Mais il peut également contenir d'autres éléments pour améliorer ses propriétés spécifiques (additif). L'industrie automobile, la construction, l'aérospatiale, l'énergie et bien d'autres secteurs dépendent de l'acier pour diverses applications en raison de sa résistance, de sa durabilité et de sa malléabilité.

En plus de sa force mécanique, l'acier offre une excellente résistance à la corrosion, ce qui le rend idéal pour les environnements exigeants. Les différents types d'acier, tels que l'acier inoxydable, l'acier au carbone et l'acier allié, offrent des caractéristiques distinctes qui les rendent adaptés à des utilisations spécifiques. [5]



**Figure I.5:** tubes en acier.

#### I.3.1 Types d'aciers :

Les aciers sont désignés en plusieurs catégories : les aciers non alliés, les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés.

- **Aciers non alliés :** Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique et dans la construction métallique, leur désignation se fait de manière précise : le pourcentage de la teneur moyenne en carbone multipliée par 100, suivi par le symbole d'acier non allié.[5]

**Exemple :** GC22 : acier moulé non allié, avec 0,22 % teneur de carbone.

- **Aciers alliés :** On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

- **Aciers faiblement alliés** : Il s'agit d'un type d'acier caractérisé par une teneur en éléments d'addition ne dépassant pas 5%. Ces aciers sont spécialement conçus pour répondre aux exigences de résistance mécanique élevée dans divers domaines d'application. Leur désignation se fait de manière précise : le pourcentage de carbone est multiplié par 100, suivi des symboles des éléments d'addition, classés par ordre décroissant de leur proportion. Les pourcentages de ces éléments sont ensuite multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 pour indiquer leur contribution à la composition de l'alliage avec une plus grande précision. Cette méthode de désignation permet une identification précise de la composition des aciers, ce qui est essentiel pour assurer leur performance optimale dans diverses applications industrielles.[6]

Exemple de désignation : G 35 Ni Cr Mo 16-8 G : Acier moulé 35 : 0.35% de carbone 4% de nickel, 2% de chrome et des traces de molybdène d)

#### Types d'aciers faiblement alliée :

| Types d'acier                         | Composition typique (m%)                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| Acier doux à faible teneur en carbone | Fe + 0,04 – 0,3 C ( $\pm$ 0,8 Mn)          |
| Acier à moyenne teneur en carbone     | Fe + 0,3 – 0,7 C ( $\pm$ 0,8 Mn)           |
| Acier à forte teneur en carbone       | Fe + 0,7 – 1,7 C ( $\pm$ 0,8 Mn)           |
| Acier faiblement alliée               | Fe + 0,2 – 0,8 C ( $\pm$ 0,8 Mn) 1 Cr 2 Ni |

**Tableau I.1** : les types d'aciers faiblement alliés.

Le tableau présente divers types d'aciers faiblement alliés pour une meilleure illustration.[6]

- **Aciers fortement alliés** :

Aciers fortement alliés Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable, réfractaire...). Pour ces aciers, au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5%. Désignation : Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. La seule différence avec les aciers fortement alliés est pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition. Ces aciers sont réservés à des usages particuliers, par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%)

Exemple de désignation : G X 6 Cr Ni Ti 18-11 G : acier moulé X : catégorie des aciers fortement alliés 0,06% de carbone 18% de chrome, 11% de nickel et des traces de titane (moins de 1%) [5].

## I.4 Acier inoxydable

### I.4.1 Définition

Les aciers inoxydables sont des aciers hautement alliés avec une teneur en chrome variant généralement entre 12 % et 30 %, et en nickel entre 0 % et 30 %. Ces alliages métalliques ferreux sont d'une grande importance et sont connus depuis environ un siècle. Depuis leur développement initial, l'acier inoxydable a apporté une révolution dans le domaine des matériaux en raison de sa polyvalence et de ses nombreuses applications variées. C'est leur polyvalence et la diversité de leurs applications qui expliquent leur importance significative [7].



Figure I.6: aciers inoxydables.

### I.4.2 Types des aciers inoxydables [8] :

Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables, comprenant :

- **Les aciers inoxydables ferritiques** Ces aciers se caractérisent par l'absence de transformation en phase austénitique. Les éléments stabilisant la phase ferritique sont le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le silicium (Si), le titane (Ti) et le niobium (Nb).
- **Les aciers inoxydables martensitiques**

Ces alliages à base de fer et de chrome (Fe-Cr) présentent une structure martensitique obtenue par trempe. Cette structure confère des propriétés de dureté et de résistance élevées, comme dans tous les aciers.

- **Les aciers inoxydables austénitiques**

Dans cette catégorie, les concentrations en éléments gammas (nickel et carbone) sont suffisantes pour obtenir une structure austénitique à haute température. Ces aciers contiennent en moyenne 18 % de chrome (Cr), 10 % de nickel (Ni) et 0,060 % de carbone (C), assurant une bonne résistance à la corrosion grâce à la teneur élevée en chrome.

- **Les aciers inoxydables austéno-ferritiques**

Ces aciers sont constitués de deux phases, l'austénite ( $\gamma$ ) et la ferrite ( $\alpha$ ). Lors de la solidification, la ferrite se forme en premier, suivie de la germination de la phase austénitique.

#### **I .4.3 les Propriétés mécaniques des aciers inoxydables [9] :**

- **Resistance a la traction :** l'inox peut résister à des forces de traction élevée sans se déformer de manière permanente ou se rompre.
- **Resistance à la corrosion :** C'est la capacité de l'acier à résister à la dégradation chimique avec l'environnement, pour assurer la durabilité et la fiabilité d'un matériaux.
- **Resistance a la compression :** l'inox possède la capacité de supporter des charges importantes sans se déformer.
- **Ductilité :** cette propriété est très importante en mécanique, car elle permet à l'acier de se déformer sans se rompre.
- **Ténacité :** l'acier peut absorber de l'énergie avant de se rompre, donc il possède une ténacité.
- **Dureté :** l'acier peut être durci par différentes procédés de traitement thermique, ce qui lui donne une grande résistance à la déformation (dureté élevée).

#### **I.4.4 Domaines d'utilisation des aciers inoxydable**

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans divers secteurs, notamment :

- Dans l'industrie des pipelines pour le transport de pétrole et de gaz, les aciers inoxydables sont employés pour résister à la corrosion, un problème majeur qui provoque des ruptures ou des fuites importantes.
- Ils sont également utilisés dans les tuyaux de fond et les têtes de puits, les conduites d'écoulement, les ombilicaux, les cuves de tuyauterie de procédé, les systèmes d'eau, les usines de dessalement, les équipements de dépollution, les chimiquiers, les pièces mécaniques, les systèmes haute pression et les échangeurs de chaleur.

- Ces aciers trouvent des applications dans les usines de pâtes et papiers, les fluides de traitement contenant des chlorures, les solutions de carbonate d'ammonium, les industries minières et de traitement des minéraux, les usines d'engrais, ainsi que dans de nombreuses autres industries chimiques.[10]

## **I.5 Systèmes d'absorption d'énergie**

### **I.5.1 Description générale des systèmes d'absorption d'énergie des matériaux**

Les systèmes d'absorption d'énergie des matériaux jouent un rôle important dans de nombreux secteurs industriels tels que, l'automobile, l'aérospatiale, la construction de système de levage et l'impact, et la protection individuelle. Souvent, ces matériaux sont fabriqués spécialement pour absorber, disperser ou dissiper (diminue) efficacement l'énergie produite par les chocs et/ou les vibrations. Cependant, des techniques de sélection des matériaux ont été développées pour satisfaire des caractéristiques données [11]. Le choix judicieux et l'intégration collaboratif de ces matériaux stratégiques dans la conception et la fabrication de systèmes d'absorption d'énergie sont essentiels pour répondre aux exigences spécifiques des applications industrielles. Ces approches permettent d'optimiser les performances, la durabilité et la sécurité des produits et des structures [12].

### **I.5.2 Matériaux Stratégiques pour l'Absorption d'Énergie : Caractéristiques, Mécanismes et Applications**

#### **❖ Alliages Métalliques**

Les alliages métalliques, tels que l'acier et l'aluminium, sont appréciés pour leur capacité à absorber l'énergie par déformation plastique et leur haute résistance mécanique. Ils sont largement utilisés dans la fabrication de structures de véhicules et de dispositifs de sécurité, où leur légèreté, leur robustesse et leur capacité d'absorption d'énergie sont des atouts essentiels.

#### **❖ Polymères et Élastomères**

Les polymères comme les polyuréthanes et les élastomères sont valorisés pour leurs propriétés de frottement, de dissipation d'énergie et de déformation réversible. Leur capacité à absorber l'énergie par déformation élastique, plastique et friction interne en font des choix privilégiés pour diverses applications. Ils sont largement utilisés dans la fabrication d'amortisseurs, de joints d'étanchéité, de revêtements antidérapants, d'équipements sportifs et de dispositifs de protection individuelle, où une absorption d'énergie efficace et une haute résilience sont essentielles.

### ❖ Composites Avancés

Les composites avancés, associant fibres de carbone, de verre ou d'aramides à une matrice polymère ou métallique, sont conçus pour maximiser l'absorption d'énergie tout en minimisant le poids et en renforçant la structure. Ils sont largement utilisés dans des secteurs comme l'aérospatiale, l'automobile et la construction, offrant des performances améliorées et une résistance accrue aux contraintes mécaniques.

### ❖ Mousses et Matériaux à Structure Cellulaire

Les mousses synthétiques ou naturelles et les matériaux à structure cellulaire tirent parti des propriétés de déformation et de compression des cellules d'air ou de gaz dans leur structure poreuse pour une absorption efficace de l'énergie. Leur combinaison de légèreté, de déformabilité et de résilience les rend idéaux pour absorber les chocs, les vibrations et les impacts. Ils sont largement utilisés dans la fabrication d'amortisseurs, de coussins de protection, de revêtements acoustiques, d'équipements sportifs et de dispositifs de sécurité dans divers domaines industriels, commerciaux et récréatifs.

#### I.5.2.1 Les systèmes d'absorption d'énergie des matériaux métalliques

Les systèmes d'absorption d'énergie des matériaux métalliques sont des dispositifs spécialement conçus pour maximiser la capacité des métaux à absorber et dissiper l'énergie lors de charges dynamiques ou d'impacts. Ils sont essentiels dans des secteurs comme l'automobile, l'aérospatiale et la défense pour minimiser les déformations excessives et protéger les équipements contre les dommages. Ces systèmes utilisent divers mécanismes, tels que la déformation plastique contrôlée et la dissipation d'énergie par friction, et nécessitent une analyse détaillée des charges, des conditions d'impact et des exigences de performance. En fin de compte, ils visent à améliorer la sécurité et la fiabilité des structures métalliques dans des applications critiques [13].

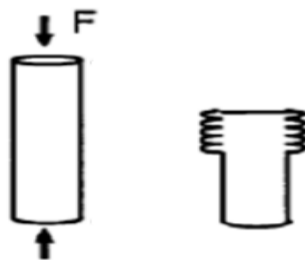


**Figure I.7:** tube métallique avant et après déformation.

Lors de la compression d'un tube métallique, son comportement mécanique évolue en plusieurs étapes distinctes. Initialement élastique, le tube peut retrouver sa forme initiale une fois la charge retirée. Ensuite, il entre en phase plastique, où la déformation devient permanente sans augmentation significative de la force. Par la suite, le matériau subit un processus de durcissement, augmentant progressivement la force nécessaire pour poursuivre la déformation. Enfin, si la force continue d'augmenter, le tube atteindra son point de rupture et se rompra [14].

▪ **Courbe Force-Déplacement Typique de Compression :**

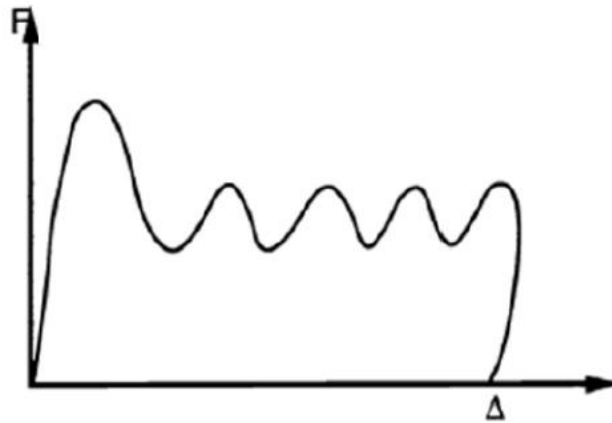


**Figure I.8 :** Courbe force déplacement typique de compression uni-axial.

- **Équations d'Énergie Absorbée et Force Moyenne**

L'énergie absorbée  $W$  par le tube métallique pendant la compression peut être calculée en intégrant la courbe force-déplacement :

$$W = \int_0^D F(x) \quad (\text{I.1})$$

Où  $F(x)$  est la force en fonction du déplacement  $x$  et  $D$  est le déplacement total.

La force moyenne  $F_{\text{moy}}$  pendant la compression est calculée comme suit :

$$F_{\text{moy}} = \frac{W}{D} \quad (\text{I.2})$$

Un tube métallique capable d'absorber efficacement l'énergie pendant la compression peut détecter la déformation excessive ou la rupture des éléments structuraux, ce qui est particulièrement important dans les applications où la sécurité est cruciale.

En résumé, la compréhension du comportement du tube métallique avant et après la déformation plastique, ainsi que l'analyse de la courbe force-déplacement et des équations

associées, sont essentielles pour concevoir des structures résistants et sécurisées capables d'absorber efficacement l'énergie lors de compressions et d'impacts.

### **I.6 Généralités sur les principaux mécanismes d'absorption d'énergie [14]**

Les mécanismes d'absorption d'énergie jouent un rôle crucial en ingénierie et en sécurité pour réduire les effets des impacts et des chocs. Ils convertissent l'énergie cinétique libérée lors d'un impact en formes moins dommageables, réduisant ainsi les dommages potentiels. Intégrés dans divers secteurs comme l'automobile, l'industrie et l'aérospatiale, ces mécanismes sont essentiels pour concevoir des systèmes de sécurité efficaces, tels que les pare-chocs et les airbags. Ils visent à prolonger la durée de l'impact et à dissiper l'énergie cinétique de manière contrôlée pour minimiser les risques de blessures graves et de dommages matériels. En réponse à l'accent accru sur la sécurité passive, des dispositifs spécialisés ont été développés pour la dissipation d'énergie, répondant aux normes élevées de résistance aux chocs des véhicules. Deux concepts clés guident la conception de ces dispositifs :

- Les systèmes qui opèrent sur la base du frottement comprennent les freins et les pneumatiques.
- Les systèmes basés sur les grandes déformations, qu'elles soient purement élastiques ou élasto-plastiques, englobent les ressorts, les amortisseurs, différents profilés, plaques et tubes.

Ces dispositifs sont utilisés dans divers systèmes mécaniques tels que les véhicules routiers, les trains, les avions, les ascenseurs, etc. De nombreux systèmes de sécurité passive s'appuient sur le concept de grandes déformations comme principe fondamental

#### **I.6.1 Dissipation d'énergie par déformation élastique [15]**

L'absorption d'énergie par déformation élastique constitue un axe de recherche essentiel en ingénierie des matériaux et en conception mécanique. Cette technologie permet de transformer et de dissiper l'énergie générée lors d'un impact ou d'une charge dynamique en exploitant les propriétés élastiques fondamentaux des matériaux. Ce système est couramment utilisé dans diverses applications, notamment dans l'ingénierie des matériaux, les dispositifs de sécurité, les structures et les équipements de protection individuelle.

### I.6.1.1 Fondements et mécanismes de déformation élastique [16]

Le mécanisme central de l'absorption d'énergie par déformation élastique se fonde sur la capacité d'un matériau à subir une déformation réversible sous l'effet d'une contrainte externe. Lorsqu'un matériau est soumis à une charge, les liaisons atomiques à l'intérieur du matériau sont étirées, provoquant une déformation élastique. Cette déformation demeure élastique tant que la contrainte exercée reste inférieure à la limite élastique du matériau. Une fois la charge supprimée.

#### - Automobiles

Les pare-chocs et les structures à zones de déformation programmée sont conçus pour absorber et dissiper l'énergie des collisions, garantissant ainsi la sécurité des occupants et la préservation des véhicules. Les ingénieurs automobiles ont élaboré des trajets et des zones spécifiques dans la carrosserie pour répartir efficacement les forces lors d'une collision, assurant une répartition adéquate des forces pour différents types d'impact. Des schémas sont utilisés pour illustrer la manière dont les forces se propagent lors d'une collision frontale, mettant en évidence l'efficacité de ces dispositifs de sécurité.

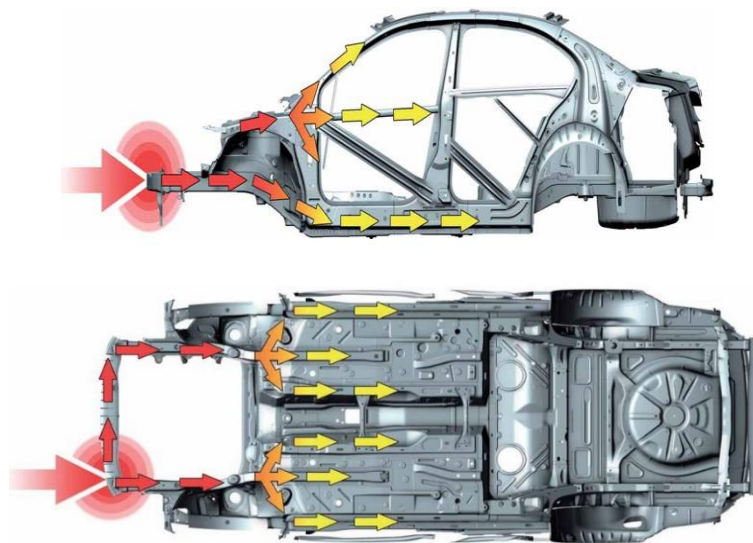


**Figure I.9 :** Zones de déformations (la diffusion des forces lors d'un impact frontal).

#### - Dispositifs de Sécurité

Les airbags jouent un rôle essentiel dans l'absorption d'énergie lors d'un accident de voiture en utilisant la déformation élastique des matériaux. Leur conception vise à exploiter ces propriétés pour minimiser les dommages aux occupants du véhicule. Lors du déploiement, l'airbag agit comme un coussin absorbant l'énergie cinétique de l'impact, réduisant ainsi la force du choc et

la pression exercée sur les occupants. Cette déformation élastique aide à prévenir les blessures graves telles que les traumatismes crâniens, les fractures et les lésions internes [12].

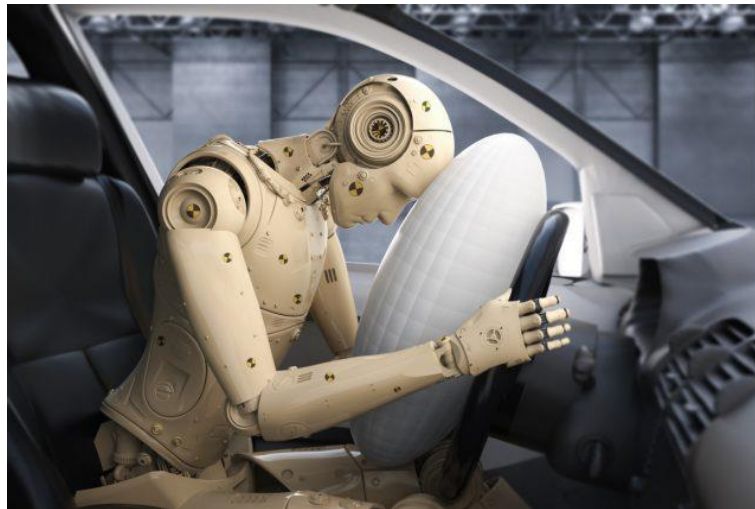


**Figure I.10** : un dispositif de sécurité passive standards d'une voiture airbag.

#### - Équipements de Protection Individuelle

Les équipements de protection individuelle, tels que les casques, les gilets pare-balles et les protections articulaires, sont essentiels pour prévenir les blessures corporelles lors d'activités à risque. Ils intègrent des matériaux spécialement conçus pour exploiter la déformation élastique, réduisant ainsi l'impact des chocs et les risques de lésions graves. Les casques utilisent des matériaux comme le polystyrène expansé pour absorber l'énergie de l'impact et minimiser les traumatismes crâniens. Les gilets pare-balles modernes utilisent des matériaux composites comme le Kevlar pour disperser l'énergie cinétique des projectiles ou des impacts, offrant une protection efficace contre les blessures par pénétration ou contusions.

#### - Protections Articulaires

Les protections articulaires, comme les genouillères et les coudières, utilisent des matériaux à déformation élastique comme le néoprène pour absorber l'énergie des chocs et réduire les risques de blessures traumatiques ou de fractures. Cette approche renforce la sécurité lors d'activités à risque en offrant une protection améliorée et une plus grande résilience face aux forces extérieures.

#### - Constructions et Infrastructures

Certaines constructions et infrastructures intègrent des zones de déformation conçues pour absorber efficacement l'énergie des sollicitations sismiques ou des charges dynamiques. Cette conception vise à optimiser la résistance de la structure en permettant une déformation

contrôlée. En absorbant l'énergie excédentaire, ces zones préviennent les déformations excessives et renforcent la résilience des structures face aux conditions extrêmes. Leur intégration est essentielle pour minimiser les dommages potentiels, garantir la sécurité des occupants et prolonger la durée de vie des ouvrages. Cette approche proactive renforce la confiance dans la solidité des constructions modernes.

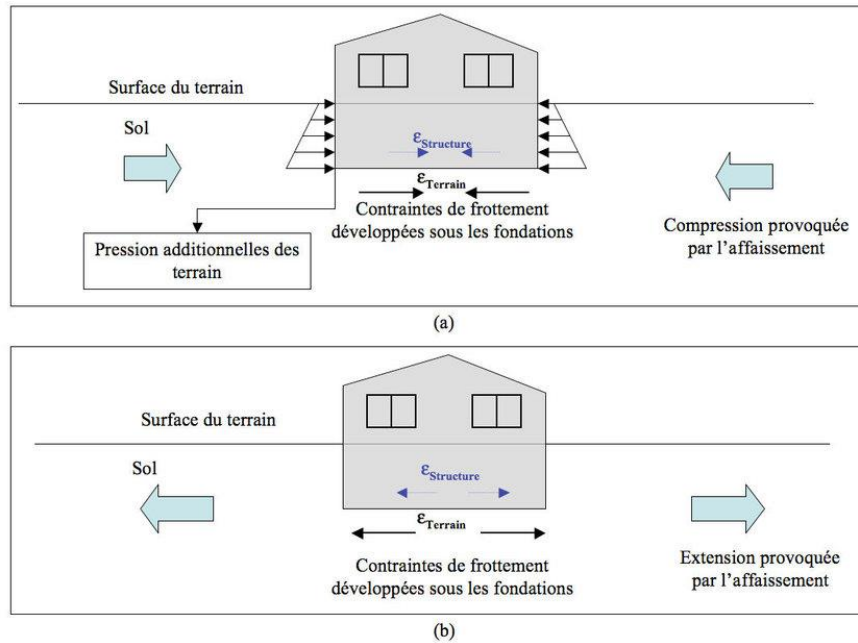


**Figure I.11:** Réaction d'une structure face à la déformation horizontale du terrain.

L'exploitation de la déformation élastique pour absorber l'énergie offre une méthode innovante et adaptable à diverses situations. En comprenant les mécanismes de déformation élastique et en sélectionnant soigneusement les matériaux, il est possible de concevoir des systèmes sécurisés et performants. Cependant, une compréhension approfondie des forces et des faiblesses de cette méthode est essentielle pour son développement continu. Des recherches continues dans ce domaine sont nécessaires pour favoriser l'innovation et améliorer les capacités des systèmes exploitant la déformation élastique. [12]

### I.6.2 Systèmes conventionnels d'absorption d'énergie par déformation plastique.

L'absorption d'énergie par déformation plastique est un mécanisme avancé et essentiel utilisé pour dissiper l'énergie provenant de charges appliquées sur un matériau ou un système. Ce processus se produit lorsque le matériau subit une déformation irréversible due à une charge externe, ce qui permet de réduire les contraintes et les dommages potentiels sur le système ou la structure.

Les systèmes conventionnels utilisent des matériaux métalliques sophistiqués comme l'acier et l'aluminium, qui se déforment de manière permanente sous contrainte élevée. Lors d'un impact, ces matériaux subissent une transformation plastique contrôlée, convertissant efficacement l'énergie cinétique en énergie déformatrice pour réduire les dommages potentiels sur le système et protéger les occupants [15].

### **I.6.3 Absorption d'énergie via la déformation plastique des structures tubulaires cylindriques en acier**

Les structures tubulaires cylindriques en acier sont reconnues pour leur robustesse mécanique, offrant une résistance exceptionnelle à la traction, à la compression et à la flexion, les rendant idéales pour des applications structurelles exigeantes. Leur conception en acier combine légèreté et durabilité, facilitant la manutention et garantissant une longévité accrue, même dans des conditions environnementales difficiles. La déformation plastique de ces structures est un sujet clé en ingénierie des matériaux et des structures. Elle est influencée par divers facteurs tels que les propriétés mécaniques de l'acier, la géométrie de la structure et les conditions de chargement. Comprendre et modéliser ce comportement est crucial pour optimiser la performance et la sécurité de ces structures dans diverses applications industrielles [12].

### **I.6.4 Phénomène de flambage des structures tubulaires**

Le flambage est un mode de défaillance d'un élément de structure sous contrainte de compression, provoquant une déviation latérale soudaine, plus fréquent dans les poteaux que dans les poutres. Il se produit lorsque les structures, y compris les tubulaires, sont soumises à des charges de compression axiales. Contrairement à la "flèche" qui décrit un déplacement prévisible sous flexion, la déformation latérale du flambage est instable et imprévisible, chaque charge additionnelle entraînant des déformations significatives [17].

#### **I.6.4.1 Différents types de flambage [18]**

Le risque d'instabilité est présent dans toute structure soumise à une compression. Il se manifeste principalement sous trois formes :

- Flambement, associé à la compression pure
- Déversement, lié à la flexion
- Voilement, causé par la torsion

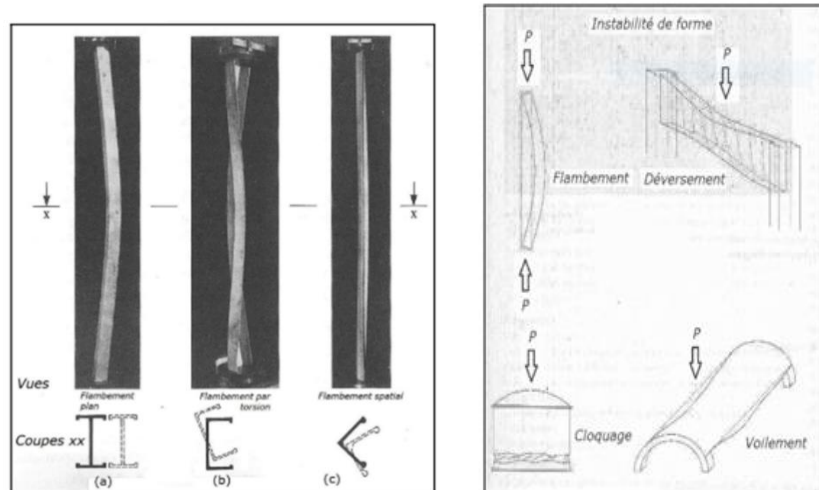


**Figure I.12 :** flambement divers et Autres formes d'instabilités.

Les phénomènes d'instabilité peuvent être classés en deux catégories :

- Instabilités locales, concernant notamment les barres de treillis et le voilement
- Instabilités globales, telles que le flambement d'ensemble.

#### **I.6.4.3 Flambages des structures tubulaires sous sollicitation radiale**

Le flambage des structures tubulaires sous chargement radial désigne la déformation latérale que ces structures subissent lorsqu'elles sont exposées à une charge perpendiculaire à leur axe, que ce soit à cause d'une pression interne exercée par un fluide ou d'une charge externe appliquée radialement.

Cette déformation peut conduire à une perte de stabilité et d'intégrité de la structure tubulaire, pouvant aller jusqu'à une défaillance totale si les contraintes radiales excèdent sa capacité de résistance.

Plusieurs types de sollicitations entraînant des déformations plastiques sont liés à ce genre de structures.

- **Flambages des structures tubulaires sous chargement localisé**

Le flambage des structures tubulaires sous une charge concentrée se produit lorsque la paroi du tube subit une déformation instable en raison d'une contrainte de compression locale excessive. Cette déformation peut conduire à une déformation plastique ou à la rupture de la structure si elle dépasse la limite de résistance du matériau. Les facteurs tels que l'intensité de la charge, la configuration de la section transversale et la longueur non soutenue de la structure influencent le risque de flambage. Pour minimiser ce risque, il est nécessaire d'adopter une

conception optimisée, de sélectionner des matériaux adéquats et d'intégrer des renforts structuraux. Ainsi, une approche de conception éclairée est essentielle pour garantir la fiabilité et la durabilité des structures.

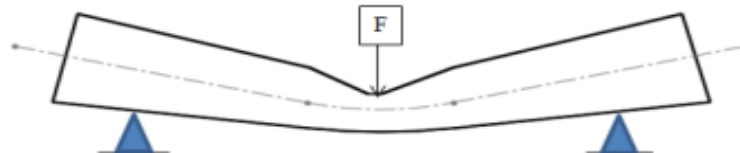


**Figure I.13:** tube déformé sous chargement latéral localisé.

- **Flambage par compression latérale**

Le flambage par compression latérale est une déviation instable observée dans les structures telles que les colonnes ou les poutres soumises à une compression axiale. Lorsque cette compression dépasse une valeur critique, la structure peut commencer à fléchir latéralement, déviant ainsi de sa direction initiale au lieu de supporter la charge de manière uniforme.

Ce mode de déformation implique d'aplatir un tube sur toute sa longueur en suivant son axe de symétrie. Il consiste à écraser progressivement l'éprouvette extraite du tube entre des plaques de compression, perpendiculairement à l'axe longitudinal.

La figure I.14 illustre le processus d'écrasement latéral d'un tube placé entre deux plateaux rigides et parallèles d'une machine de compression.

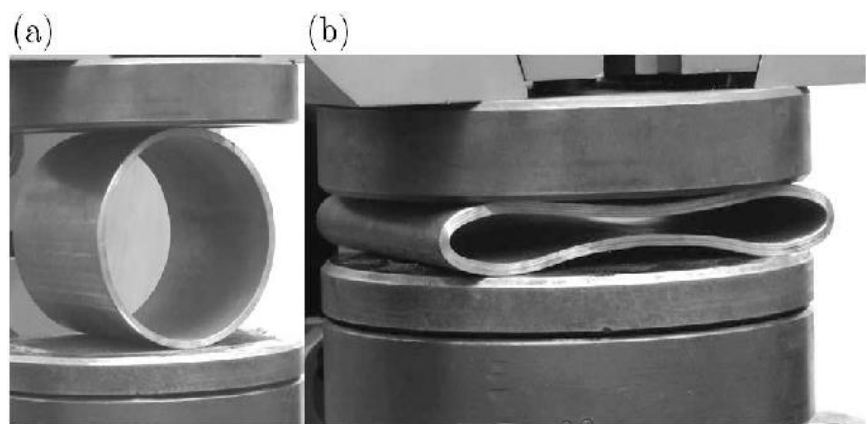


**Figure I.14 :** Essai de compression latérale du tube unique : (a) – éprouvette avant chargement, (b) – mode de rupture.

Il est important de souligner que Johnson et Reid, parmi d'autres chercheurs, ont clairement démontré qu'une structure tubulaire de forme circulaire, soumise à une charge latérale, requiert moins d'intensité qu'un tube identique, composé du même matériau, mais subissant un écrasement axial. Cette observation suggère une consommation d'énergie plus efficace pour ce dernier type de sollicitation, justifiant ainsi l'importance accordée à cette méthode de dissipation d'énergie par déformation plastique.[12]

### I.6.5 Ecrasement de structures tubulaires sous chargement axial

La déformation axiale est l'un des types de déformations les plus fondamentaux et couramment observés dans les structures tubulaires en acier. Elle se produit le long de l'axe principal de la structure et est causée par des charges axiales, telles que la compression ou la traction.

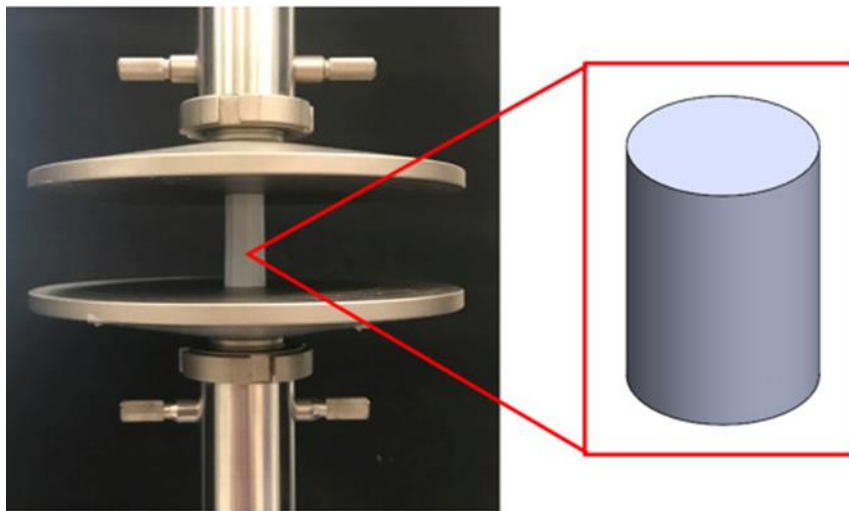


**Figure I.15 :** Essai de compression axial d'un tube.

Les composants les plus couramment utilisés comme absorbeurs d'énergie sont les structures tubulaires à parois minces soumises à une charge axiale. Ce type de chargement entraîne divers mécanismes de déformation plastique tels que l'inversion, le fractionnement, la division et le flambage plastique progressif. Ces observations ont conduit à la création de modèles théoriques permettant d'évaluer les charges moyennes de compression ainsi que les capacités d'absorption d'énergie des structures sous compression.

#### I.6.5.1 Déformation progressive des tubes

Le flambage progressif des tubes se produit lorsque ces derniers sont soumis à une charge axiale ou à une pression externe qui excède leur capacité de résistance. Lorsque cette charge augmente, le tube commence à se déformer de manière non uniforme, ce qui peut

potentiellement entraîner sa défaillance. Le flambage est caractérisé par une instabilité élastique où le tube perd sa capacité à soutenir efficacement la charge axiale. À mesure que la pression ou la charge augmente, le tube se plie et se déforme progressivement, pouvant conduire à sa rupture ou à une déformation permanente.

Plusieurs éléments peuvent influencer sur le flambage des tubes, tels que la forme du tube, les matériaux employés, sa longueur et les conditions de chargement. Les tubes qui sont longs et fins sont généralement plus enclins à flamber sous des charges axiales importantes. [19]

Trois modes principaux de déformation ont été identifiés lors de l'écrasement de ces structures comme illustré dans la figure I.16 :



**Figure I.16 :** Diverses méthodes de déformation des structures tubulaires soumises à un écrasement axial [19]

- **Mode axisymétrique (AM) :** Le mode de déformation axisymétrique d'un tube fait référence à la déformation d'un tube cylindrique sous des charges ou des contraintes qui sont symétriques par rapport à l'axe longitudinal du tube. Dans ce mode de déformation, les propriétés et les caractéristiques du tube restent constantes le long de sa circonférence, ce qui entraîne une symétrie autour de l'axe central du tube.
- **Mode mixte (XM) :** Le mode de déformation mixte d'un tube désigne une association de déformations axiales, circonférentielles et radiales qui se manifestent simultanément à l'intérieur du tube en raison de charges ou de contraintes variées. À la différence du mode axisymétrique où les déformations sont uniformément symétriques par rapport à

l'axe longitudinal du tube, le mode mixte engendre des déformations asymétriques qui dépendent de la direction et de la localisation des charges exercées.

- **Mode diamant (DM) :** Le mode de déformation diamant (non axisymétrique) d'un tube se caractérise par une absence de symétrie autour de son axe longitudinal. Contrairement au mode axisymétrique où les déformations sont uniformes autour de cet axe, le mode non axisymétrique engendre des déformations variables selon la direction et la localisation des charges ou contraintes. Ce mode peut entraîner des déformations telles que des variations de longueur, de diamètre et de forme en section transversale, ainsi que d'autres déformations asymétriques.

#### I.6.5.2 Inversion des tubes [20]

L'inversion des tubes est une méthode qui permet au tube de se déformer en se retournant sous une charge externe, augmentant ainsi la zone de déformation et favorisant une absorption efficace de l'énergie de l'impact.

Il existe deux types d'inversion des tubes :

- **Inversion interne :** Dans ce cas, le tube se déforme en renversant une partie de sa paroi vers l'intérieur de sa cavité. Cette déformation interne crée une zone de déformation concentrée à l'intérieur du tube, augmentant ainsi sa capacité d'absorption d'énergie. L'inversion interne est souvent observée dans les tubes minces ou dans des conditions où la contrainte externe est suffisamment élevée pour entraîner une déformation vers l'intérieur.
- **Inversion externe :** À l'inverse, lors de l'inversion externe, le tube se déforme en renversant une partie de sa paroi vers l'extérieur. Cette déformation externe conduit à une augmentation de la surface de déformation et permet au tube de dissiper efficacement l'énergie de l'impact. L'inversion externe est couramment rencontrée dans les applications de sécurité routière, les poteaux de crash-tests et d'autres dispositifs de protection qui nécessitent une absorption d'énergie optimale.

#### I.6.5.3 Aplatissement des tubes [12]

Quand un tube est exposé à une charge axiale, des zones de déformation plastique apparaissent à sa surface. Avec l'augmentation de la charge, cette déformation plastique s'étend à travers toute la section du tube, provoquant son aplatissement. Ce processus absorbe de

l'énergie, permettant au tube de dissiper une partie de la charge appliquée et réduisant ainsi le risque de rupture immédiate.

Un exemple illustratif de ce mécanisme se trouve dans les dispositifs de sécurité comme les barrières routières. Dans ces applications, les tubes sont spécifiquement conçus pour se déformer et s'aplatir en cas d'impact, absorbant ainsi efficacement l'énergie de l'impact et diminuant les forces transmises à l'objet ou aux personnes concernées.

### I.7 Mécanisme de détérioration des structures tubulaires composites [21]

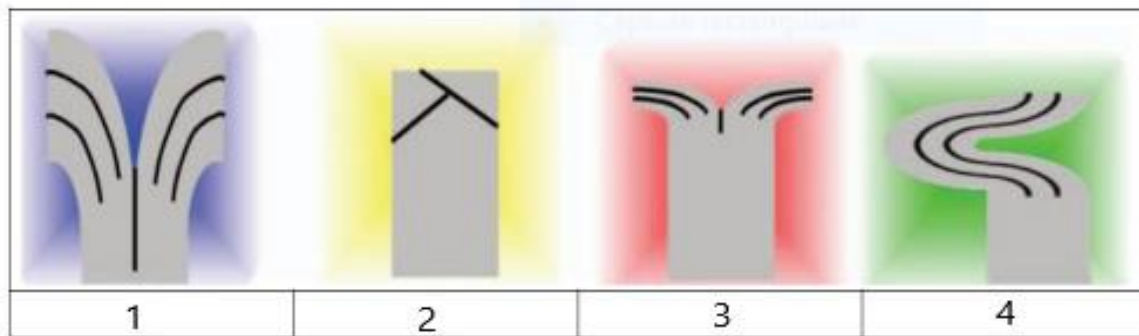
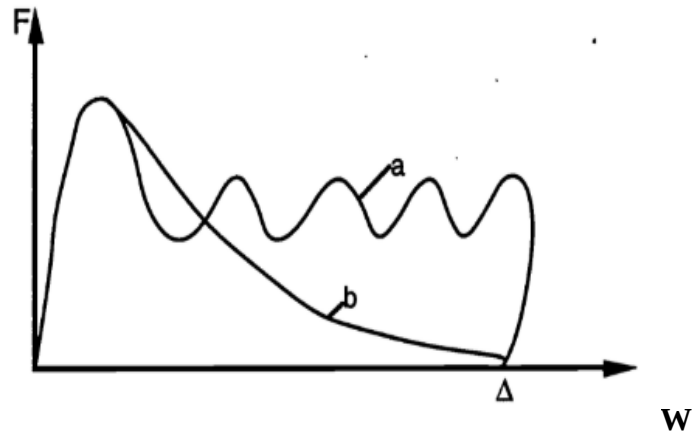


**Figure I.17 :** Mode de dégradation de la structure tubulaire composite.

- **L'évasement** : qui correspond à la dissociation des plis qui se replient sur eux-mêmes.
- **La fragmentation** : qui est la fissuration de la résine au sein des plis.
- **Le pilage** : qui est écrasement des parois.
- **Le flambement** : se traduit par une déformation de la paroi.

### I.8 Mode d'écrasement [15]

Deux modes d'écrasement en compression axiale peuvent se produire en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques du matériau : le mode d'écrasement stable et le mode d'écrasement instable. La figure I.19 montre que l'énergie dissipée lors de l'écrasement instable est nettement inférieure à celle du mode stable. Le mode stable se manifeste par la formation de plis dans les structures métalliques et par l'apparition de fissures dans les matériaux composites, tandis que le mode instable permet une faible dissipation d'énergie. Pour une meilleure absorption d'énergie, il est préférable d'adopter un mode d'écrasement stable.

**a****b****Figure I.18 :** mode d'écrasement stable « a » et instable « b ».**Figure I.19 :** courbe caractéristique des deux modes d'écrasement stable « a » et instable « b ».

## I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis tout d'abord de consolider et approfondir nos connaissances sur les aciers, y compris l'acier inoxydable. Nous avons aussi abordé les divers systèmes d'absorption d'énergie par déformation élastique ou plastique. Nous avons ainsi étudié le comportement des structures tubulaires sous chargement radial et latérale, ainsi que le phénomène de flambage des structures sous chargement axial en examinant les différents mécanismes associés. Une analyse détaillée de l'impact de chaque mécanisme sur l'absorption d'énergie a été présentée.

*Chapitre II :*  
*Étude expérimentale*

## II.1 Introduction

Nous donnons quelques appels ciblés sur les essais mécanique, et leurs principes de fonctionnements. Par la suite une présentation de la partie expérimentale de travail que nous avons fait. Trois éprouvettes en acier inoxydable sont soumises à des essais de compression. Les éprouvettes examinées dans notre travail sont des tubes de différentes longueurs (80mm,100mm,120mm). Elles ont subi un chargement de compression.

## II.2 Les essais mécaniques

Les essais mécaniques est une technique utilisée en laboratoire pour évaluer certaine propriétés mécanique et physique d'un matériau, telles que :la résistance, la dureté. La ductilité, la durée de vie en fatigue.

### ❖ Essais statiques :

- essai de traction,
- essai de compression,
- essai de flexion,
- essai de dureté, ...

### ❖ Essais dynamiques

- essai de compression dynamique,
- essai au choc,
- essai de fatigue, ...

## II.3 L'intérêt des essais

Pendant longtemps, l'empirisme et l'expérience étaient suffisants pour réaliser des opérations comme le laminage, le filage, l'extrusion, le forgeage et l'usinage. Cependant, l'augmentation de la taille des demi-produits, les standards plus élevés en matière de qualité et de précision, les impératifs d'économie d'énergie, ainsi que l'importance de la fiabilité du produit final, rendent maintenant indispensables des calculs détaillés pour ces différentes opérations afin d'explorer toutes les particularités de la déformation des matériaux la fabrication des différentes structures mécaniques et le rôle fonctionnel de chaque pièce dans son assemblage requièrent une compréhension approfondie du comportement mécanique du

matériau face aux contraintes imposées par l'environnement extérieur. En effet, connaître les propriétés mécaniques d'un matériau est essentiel pour les ingénieurs chargés des calculs structuraux à chaque étape de la mise en œuvre des matériaux. Ces calculs nécessitent une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux, souvent influencées par d'autres facteurs externes tels que la vitesse de sollicitation, la température ou les interactions entre les propriétés mécaniques et les modifications de la structure microscopique.

Les essais offrent donc directement la réponse intrinsèque des matériaux qui pourra. [22].

## II.4 Essai de traction

### II.4.1 Définition

L'essai de traction consiste à soumettre un échantillon de matériau à deux forces opposées égales. C'est une méthode expérimentale utilisée en Résistance des Matériaux (RDM) qui permet d'évaluer certaines propriétés mécaniques d'un matériau.

### II.4.2 Principe de l'essai [23]

Dans une machine de traction, on positionne l'éprouvette entre un mord fixe et un mord mobile, puis on applique une force de manière continue et progressive.

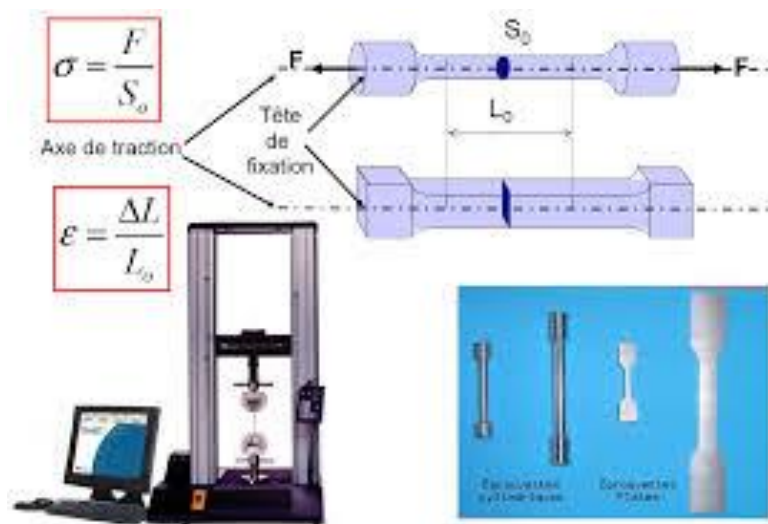


**Figure II.1:** Illustration de l'essai de traction : machine, éprouvette et évolution pendant l'essai.

### II.4.3 Eprouvettes

L'essai est généralement standardisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique (figure II.2).

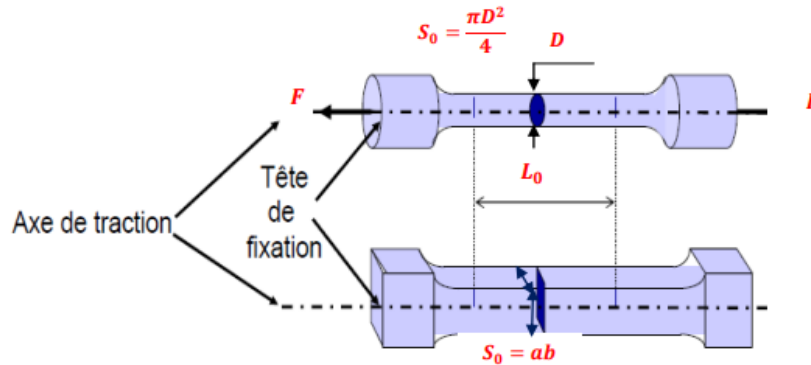


**Figure II.2 :** Éprouvette de traction : a) de forme cylindrique, b) de forme prismatique.

### II.4.4 propriétés tirés de l'essai

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de déterminer :

- **Limite d'élasticité :**

$$Re = \frac{Fe}{S_0} \quad (II.1)$$

**Re** : limite d'élasticité en Mpa.

**Fe** : la force d'élasticité en N.

**S<sub>0</sub>** : section initiale en  $mm^2$ .

- **Résistance à la traction :**

$$Rm = \frac{Fm}{S_0} \quad (II.2)$$

**Rm** : résistance à la rupture en Mpa.

**Fm** : force à la rupture en N.

- **Coefficient d'allongement (%) :**

$$A = 100. \frac{L - L_0}{L_0} \quad (II.3)$$

**Avec :**

**L** : la longueur de l'éprouvette à la rupture en (mm).

**L<sub>0</sub>** : la longueur initiale utile de l'éprouvette (mm).

- **La contrainte nominale  $\sigma_n$  :**

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad (\text{II.4})$$

**Avec :**

**F** : force en N.

**S<sub>0</sub>** : section initiale en  $mm^2$ .

- **La déformation nominale  $\varepsilon_n$  :**

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (\text{II.5})$$

**Avec :**

**$\Delta l$**  : L'allongement relatif.

**L<sub>0</sub>** : longueur initiale

**$\varepsilon$**  : La déformation nominale.

- **La déformation totale  $\varepsilon_T$  :**

$$\varepsilon_T = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (\text{II.6})$$

**Avec :**

**$\varepsilon_T$**  : déformation totale.

**$\varepsilon^e$**  : Déformation élastique.

**$\varepsilon^p$**  : Déformation plastique.

- **Coefficient de poisson  $\nu$  :**

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (\text{II.7})$$

$\varepsilon_T$ : Est la déformation transversale.

$\varepsilon_L$  : est la déformation longitudinale.

- **Module de Young E :**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{II.8})$$

$\sigma$  : la contrainte nominale.

$\varepsilon$  : la déformation.

#### II.4.5 Résultats d'un essai de traction [24],[25]

##### ❖ Courbe conventionnelle

Pour exploiter les courbes brutes de l'essai de traction de manière significative, il est nécessaire de les ajuster afin que les résultats en contraintes et déformations dépendent uniquement des caractéristiques du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. À cet effet, la charge  $F$  (N) est divisée par la section initiale  $S_0$  (mm<sup>2</sup>) de l'éprouvette pour obtenir la contrainte conventionnelle ou nominale  $\sigma_n$ (MPa). De même, l'allongement ( $\Delta L$ ) en millimètres est rapporté à la longueur initiale  $L_0$  pour calculer la déformation conventionnelle ou nominale  $\varepsilon_n$ .

En général, les propriétés mécaniques principales d'un matériau à comportement ductile en traction peuvent être déduites à partir d'une courbe conventionnelle de traction  $\sigma_n = f(\varepsilon_n)$ .

L'analyse de la courbe de traction permet de différencier deux phases essentielles : le domaine d'élasticité et le domaine plastique.

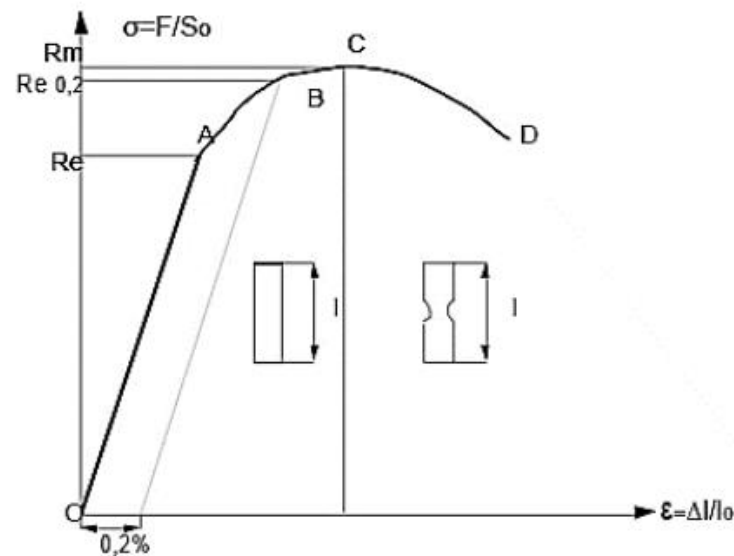


**Figure II.3:** courbe de traction.

La droite **OA** représente la déformation élastique réversible.

La courbe **AC** représente la zone de déformation plastique homogène. Si on retire la force de traction, le matériau présente un retour élastique le long d'une ligne parallèle à **OA**, laissant une déformation permanente.

Dans la zone **CD**, la force requise pour déformer le matériau diminue tandis que l'allongement continue de croître, marquant une instabilité appelée instabilité plastique, avec apparition de la striction.

En point **D** l'éprouvette se rompt.

- **Re (MPa)** : la limite d'élasticité représente aussi le seuil de début d'écoulement plastique.

Lorsque la courbe **OA** n'est pas linéaire, on doit se référer à la limite conventionnelle d'élasticité **Re0,2**, qui correspond à une déformation plastique de 0,2%. (Figure II.3).

#### ❖ Courbe rationnelle pour une catégorie de matériau, c'est

La courbe qui monte constamment, même dans la zone de striction. Elle est tracée en ajustant la force par la section minimale  $S$  pour parler de contrainte et en ajustant l'allongement par la longueur instantanée pour évoquer la déformation rationnelle, avec un volume d'éprouvette constant et une déformation uniforme de O à D pour les aciers.

**Contrainte  $\sigma$  :**

Cette contrainte tient compte de la variation de la section pendant l'essai et est égale à la charge instantanée (F) divisée par la section instantanée (S). En supposant que le volume de la partie utile de l'éprouvette de traction reste constant en raison d'une déformation élastique uniforme et que ce volume est maintenu, on obtient :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{II.9})$$

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L = S \cdot (L_0 + \Delta L) \quad (\text{II.10})$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \varepsilon_c} \quad (\text{II.11})$$

**Donc :**

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \cdot (1 + \varepsilon_c) = \varepsilon_c \cdot (1 + \varepsilon_c) \quad (\text{II.12})$$

**Pour la déformation relative :** L'allongement instantané est représenté par  $dL/L$ . À un instant donné, l'allongement total depuis le début de l'essai est L. En considérant des allongements infinitésimaux  $dl$ .

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (\text{II.13})$$

**II.5 Essai de compression****II.5.1 définition**

Un essai de compression est l'un des types d'essais mécaniques les plus fondamentaux, avec les essais de traction et de flexion .

L'essai de compression est une méthode mécanique visant à déterminer la capacité d'un matériau à résister à une force appliquée en le comprimant et en étudiant les modifications de ses dimensions sous l'effet de cette force.

### II.5.2 Objectifs de l'essai

L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction. Cependant leurs utilisations à tendance à se généralisés.

Les essais de compression visent à évaluer la résistance d'un matériau à des charges d'écrasement, aider à la sélection des matériaux appropriés pour une application spécifique, contrôler la qualité, optimiser le design, contribuer à la recherche et développement de produits.

### II.5.3 Principe de l'essai [26]

Au cours de l'essai, une force est appliquée sur l'éprouvette à l'aide de plateaux de compression ou d'outils spécifiques, fixés sur une machine d'essai universelle, pour évaluer les diverses caractéristiques du matériau testé. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette.

Pour obtenir des résultats comparables en compression, il est essentiel d'utiliser des éprouvettes de forme, de dimensions et de procédé de fabrication identiques, et de les soumettre à des essais dans des conditions bien définies, incluant le traitement préalable, la température, l'humidité et la vitesse d'application de la charge.

### II.5.4 Eprouvettes

L'éprouvette doit être sous forme d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités de l'éprouvette doivent être parallèles et perpendiculaires à la direction de l'application de la force.

- Généralement la hauteur des éprouvettes, en fonction de leurs dimensions transversales, est donnée dans la figure II.4.
- Si un flambage de l'éprouvette se produit pendant l'essai, le rapport d'effilement doit être ajusté, ce qui conduit à des éprouvettes d'une hauteur  $h_1$ .

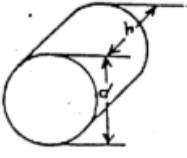
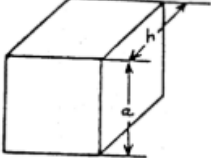
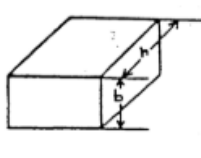
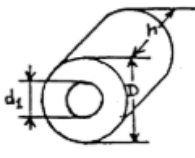
| Cylindrique                                                                       | Prisme carré                                                                      | Prisme rectangulaire                                                               | Tube cylindrique                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| $h = 2,5 \cdot d$                                                                 | $h = 2,9 \cdot a$                                                                 | $h = 2,9 \cdot b$                                                                  | $h = 2,5\sqrt{D^2 + d_i^2}$                                                         |
| $h_1 = 1,5 \cdot d$                                                               | $h_1 = 1,74 \cdot a$                                                              | $h_1 = 1,74 \cdot b$                                                               | $h_1 = 1,5\sqrt{D^2 + d_i^2}$                                                       |

**Figure II.4 :** la hauteur des éprouvettes d'un essai de compression. [27].

### II.5.5 Résultats d'un essai de compression [27]

Soit l'essai de compression sur un cylindre de section  $S$  et de longueur initiale  $L_0$ .

Sa résistance est représentée par la contrainte à la rupture  $\sigma_{max}$ . Sa capacité à se comprimer est représentée par la déformation à la rupture  $\epsilon_{max}$ .

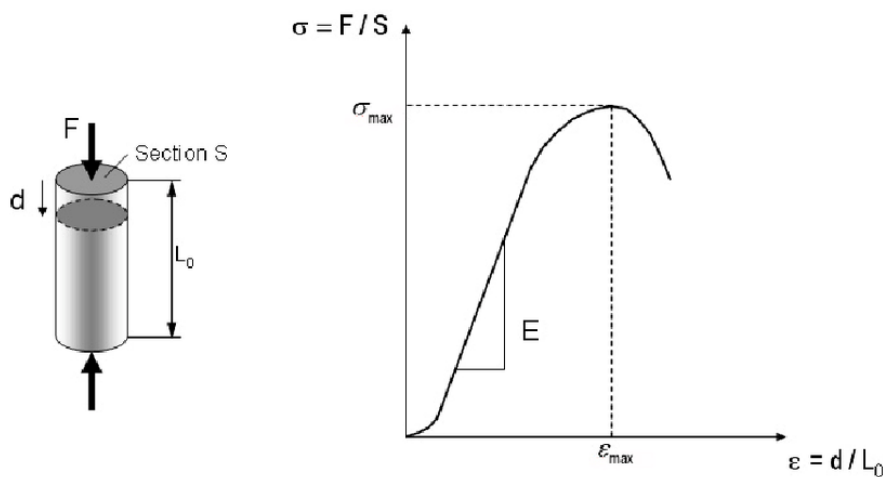


**Figure II.5 :** Courbe d'essai de compression d'un tube. [27]

Comme pour l'essai de traction, un essai de compression est une technique expérimentale permettant de déterminer des propriétés précises, semblables à celles obtenues en traction.

Pour effectuer l'essai on peut utiliser la relation au-dessous qui donne la vitesse du plateau.

$$V = 0,3 \cdot h \quad (\text{II.14})$$

$V$  = vitesse d'essai en millimètre par minute.

$h$  = hauteur de l'éprouvette en millimètres.

Les données d'essai fournissent des résultats, sous la forme d'un diagramme\_de\_contrainte-déformation , qui indique entre autre la limite\_d'élasticité et dans certains cas la résistance à la compression.

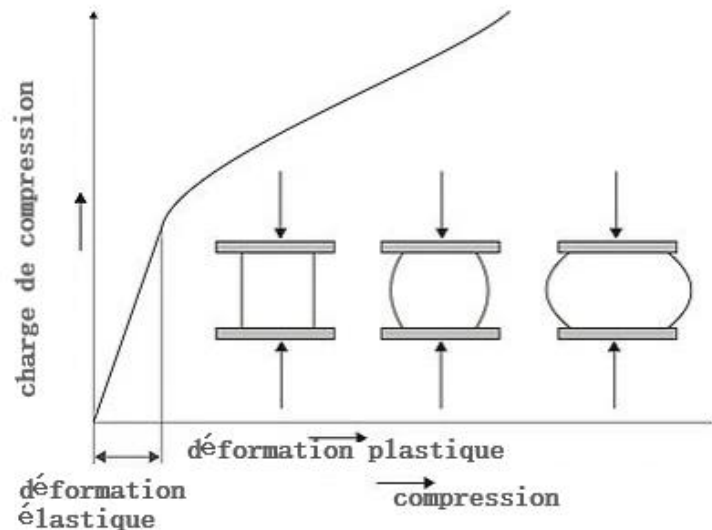


**Figure II.6 :** diagramme de contrainte allongement.

La courbe d'essai de compression illustre le comportement d'un matériau soumis à des charges de compression croissantes. La limite élastique marque le point où le matériau commence à se déformer de manière permanente (non-linière) après avoir été soumis à une force, avant cette limite le matériau conserve sa capacité de retrouver sa forme initiale si la charge est supprimée. Au-delà de cette limite, le matériau entre dans une zone de déformation plastique, où la limite plastique indique la contrainte maximale supportée avant que le matériau ne se rompe. Ces points clés permettent d'évaluer la résistance et la ductilité du matériau.

## II.6 Essai de flexion [26],[27]

### II.6.1 Définition

L'essai de flexion est l'une des méthodes de sollicitation les plus couramment utilisées. Il est utile pour évaluer les propriétés mécaniques de divers matériaux tels que les métaux, les plastiques, le bois, le papier, le carton, les céramiques.

Cet essai mesure la capacité d'un matériau à résister à la rupture en flexion lorsqu'il est soumis à une charge sur deux points de support espacés.

On distingue 3 types d'essais de flexion :

- Essai de flexion 2 points
- Essai de flexion 3 points
- Essai de flexion 4 points.

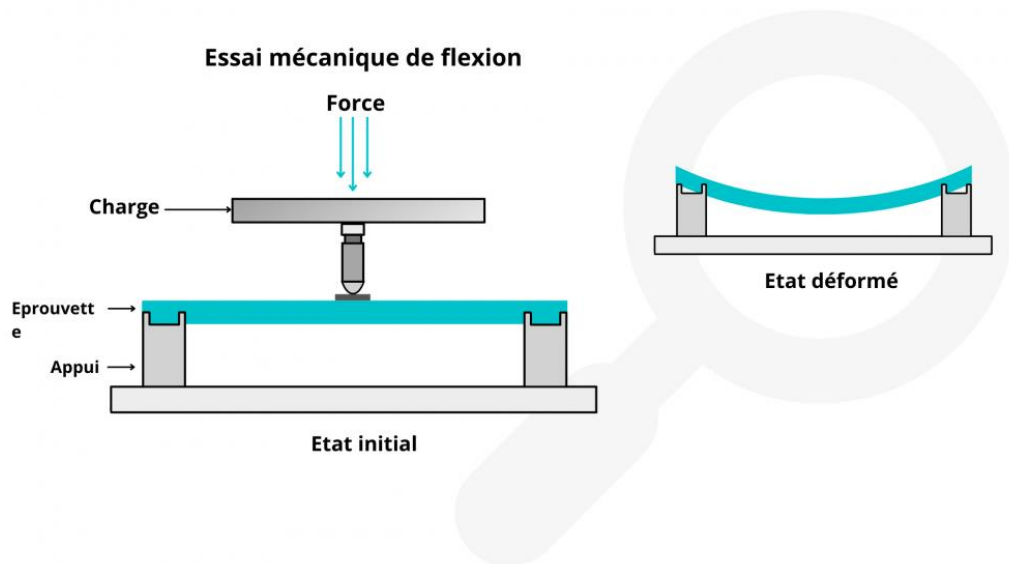


**Figure II.7:** essai mécanique de flexion.

### II.6.2 Principe de l'essai

Le principe de l'essai de flexion est d'évaluer la résistance d'un matériau à la flexion sous l'effet d'une charge appliquée. Pour réaliser cet essai, un échantillon de forme spécifique est positionné horizontalement sur deux appuis à une distance définie entre eux, appelée portée (voir la figure II.7). Une charge est ensuite appliquée verticalement au centre de l'échantillon. Pendant l'application de cette charge, la déformation de l'échantillon est mesurée à l'aide de jauges de contrainte, de capteurs de déplacement ou d'autres instruments de mesure.

### II.6.3 Echantillons

L'échantillon utilisé pour l'essai de flexion est généralement de forme rectangulaire, mais les échantillons peuvent varier dans leur section transversale en fonction de la norme ou de la méthode d'essai spécifique utilisée. Elle présente des dimensions standardisées avec une longueur spécifique, une largeur réduite et une épaisseur définie. Les échantillons sont soutenus par deux appuis situés à une distance définie l'un de l'autre, appelée portée, permettant à l'échantillon de fléchir librement sous l'effet de la charge appliquée. Un emplacement central renforcé est prévu sur l'échantillon pour l'application de la charge, et des

marques ou des encoches peuvent être présentes pour faciliter la mesure de la déformation pendant l'essai. [7]

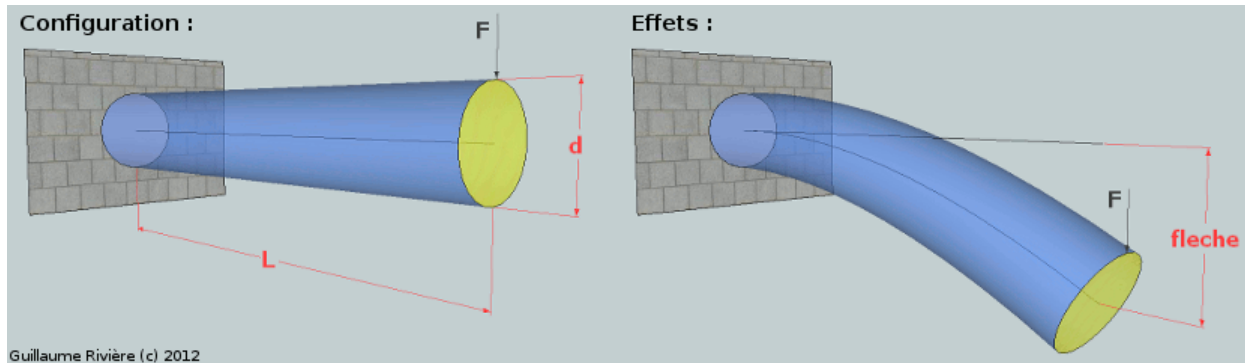


**Figure II.8 :** exemple d'une poutre cylindrique en flexion.

### II.6.5 Résultat de l'essai

Les essais de flexion sont également utiles pour détecter les points faibles des matériaux et pour optimiser leur qualité. Les paramètres mesurés sont :

- **Moment de flexion ( $M$ ) :**

$$M = F \cdot d \quad (\text{II.15})$$

$F$  : Force appliquée en Newtons (N)

$d$  : Distance entre le point d'application de la force et le point où la force est nulle en mètres (m).

- **Contrainte de flexion ( $\sigma$ ) :**

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (\text{II.16})$$

$M$  : Moment de flexion en (N.m).

$c$  : Distance du centre de gravité de la section transversale à la fibre la plus éloignée en (m).

$I$  : Moment quadratique de la section transversale en  $\text{mm}^4$ .

Le moment quadratique d'une section circulaire creuse (tube) est :

$$I = \pi (D^4 - d^4) / 64 \quad (\text{II.17})$$

$D$  : diamètre.

**-Déformation de flexion ( $\epsilon$ )**

$$\epsilon = \frac{\delta}{E} \quad (\text{II.18})$$

$\delta$ : Contrainte de flexion en (Pa).

$E$  : Module d'élasticité du matériau en (Pa).

**- Module de flexion (E) :**

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (\text{II.19})$$

**II.6.6 Résultats de l'essai**

L'essai de flexion génère une courbe représentant la relation entre la contrainte et la déformation, et fournit diverses valeurs clés comme le module de flexion, les limites d'élasticité et, le cas échéant, le point de rupture.

**II.7 Relation entre les essais mécaniques**

Les essais mécaniques comme la flexion, la traction et la compression sont essentiels pour évaluer les propriétés des matériaux, révélant leur résistance et leur comportement sous diverses contraintes. La flexion mesure la résistance à la flexion, la traction évalue la force de rupture et la ductilité, tandis que la compression teste la résistance à la compression. La ténacité et la résilience complètent ces essais. [28]

**II.8 Essai de résilience [28],[29]****II.8.1 Définition**

L'essai de résilience connu sous le nom résistance au choc est une méthode qui permette de caractériser l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie transmise lors d'un choc. Aussi la résilience est définie par la lettre K en joules (J). On trouve deux méthodes d'essai de résilience sont l'essai Charpy et Izzod. Généralement on utilise l'essai Charpy.

**II.8.2 La différence entre essai Charpy et Izod :**

|                                 | Essai Charpy                                          | Essai Izod                                               |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| La dimension de l'éprouvettes   | -longueur :55mm<br>-largeur :10mm<br>-épaisseur :10mm | -longueur :64mm<br>-largeur :12,7mm<br>-épaisseur :3,2mm |
| La disposition de l'éprouvettes | Eprouvettes entaille horizontale                      | Eprouvettes entaille verticale                           |
| Type de matériau testé.         | Les métaux ductiles                                   | -les plastiques<br>- certains métaux plus durs           |

**Tableau II.1** :la comparaison entre l'essai Charpy et l'essai Izod.**II.8.3 Objectifs de l'essais**

La réalisation de l'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance aux chocs

Energie absorbée :

$$W = W_0 - W_1 = mg(h_0 - h_1) \quad (\text{II.20})$$

**Avec :**

m : masse du mouton-pendule .

g : accélération de la pesanteur (environ 9,81 m.s<sup>-2</sup>) ..

$h_0$  : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ

$h_1$  : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée.

Résilience :

$$K = \frac{W}{S} \quad (\text{II.21})$$

**Avec :**

W : l'Energie absorbée en joules(j).

S : section après entaille en  $mm^2$ .

#### II.8.4 Principe de l'essai (essai Charpy)

Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire en choc mécanique. On utilise un mouton-pendule.

Un marteau de masse  $m$  est attaché à l'extrémité d'un pendule. Le pendule est capable de pivoter autour d'un axe horizontal situé dans un plan vertical. Une éprouvette entaillée est posée sur deux appuis parallèles. Allongez le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position de départ  $P_1$ , puis relâchez-le, lorsque le pendule frapper l'éprouvette (position finale  $P_2$ ), son énergie cinétique à la position finale est équivalente à l'énergie potentielle de la position de départ  $P_1$ . L'énergie nécessaire pour briser l'éprouvette est alors donnée par :

$$W = W_0 - W_1 = mg(h_0 - h_1) \quad (II.21)$$

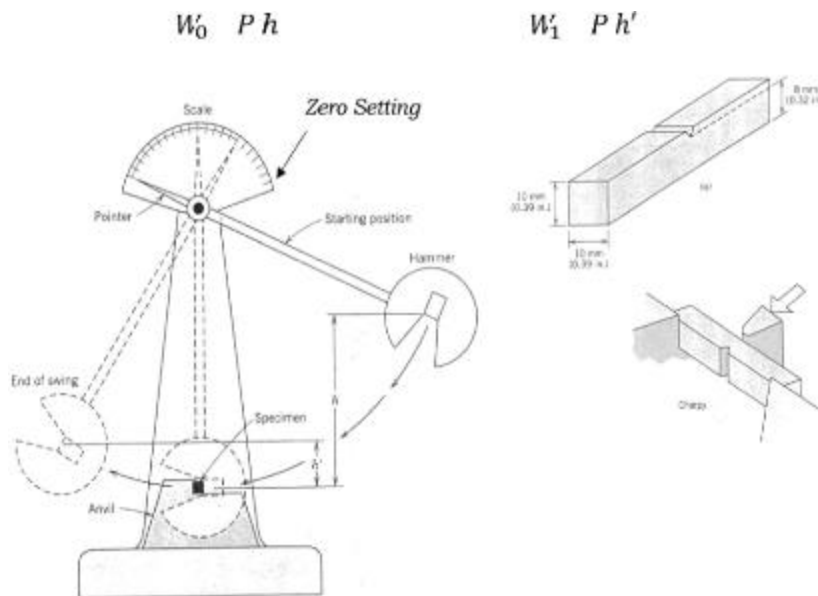
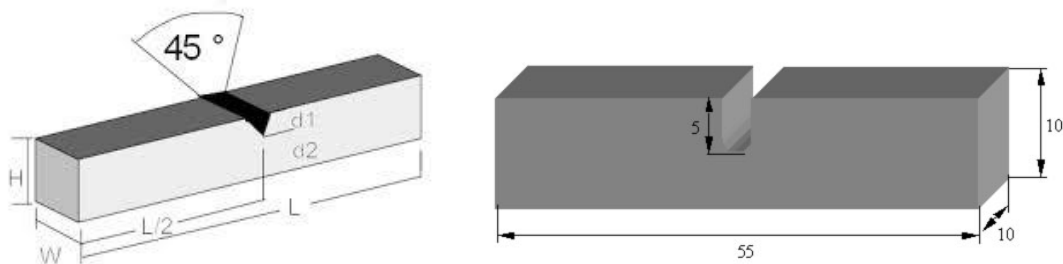


**Figure II.9 :** Expérience d'essai de Charpy

### I.5 Eprouvettes

L'essai de résilience est fait sur deux type d'éprouvettes : éprouvettes entaillées en forme (V), et en forme (U). Est généralement les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes parallélépipédiques de 55mm de long et de section carrée de 10mm de côté.



Eprouvette en forme V

Eprouvette en forme U

**Figure II.10:** les deux types d'éprouvettes

### II.8.6 Effet de température sur l'essai de résilience

Lorsque la température varie pendant l'essai de résilience les caractéristiques mécaniques d'un matériau peuvent également varier comme :

- La limite d'élasticité et la résistance à la rupture varient de manière inverse par rapport à la température.
- Les propriétés de ductilité, telles que l'allongement à la rupture évoluent de même manière avec la température.

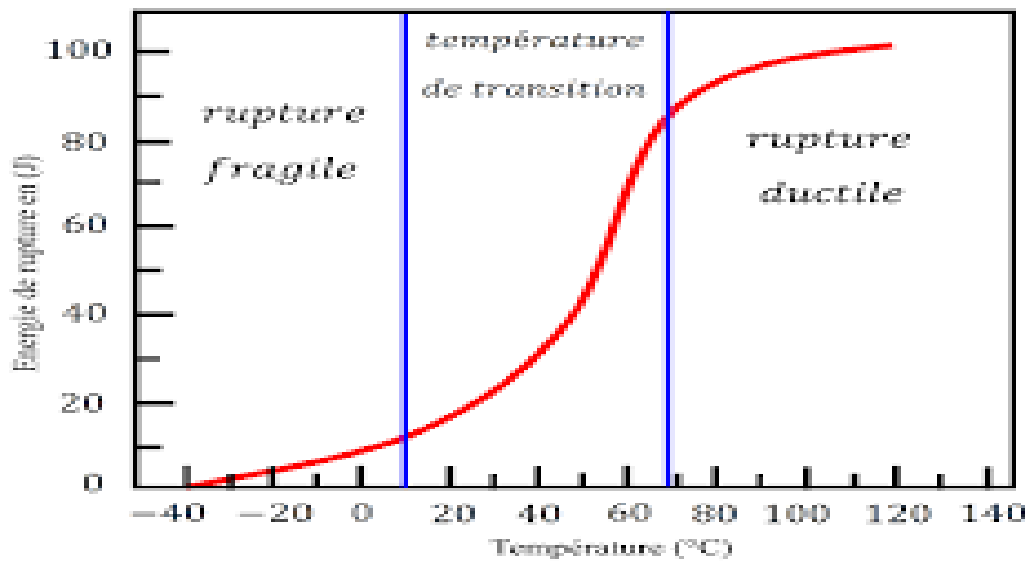


**Figure II.11:** courbe de transition de la résilience.

-**zone I** : à basses températures est celle où la rupture est fragile

-**zone II** : zone de transition est celle où la rupture est mixte.

-**zone III** : à température plus élevée est celle où la rupture est ductile.

## II.9 La ténacité [31],[32]

### II.9.1 Définition

La ténacité est une méthode expérimentale permettant de mesurer la résistance à la propagation des fissures, également on peut définir la ténacité comme l'énergie qu'un matériau peut absorber avant de se casser. La valeur critique  $KC$  appelée ténacité.

Dans l'essai de ténacité on trouve trois modes d'ouverture des fissures mode I : mode par ouverture essai de traction, mode II : mode de cisaillement plan, mode III : mode de cisaillement anti-plan.

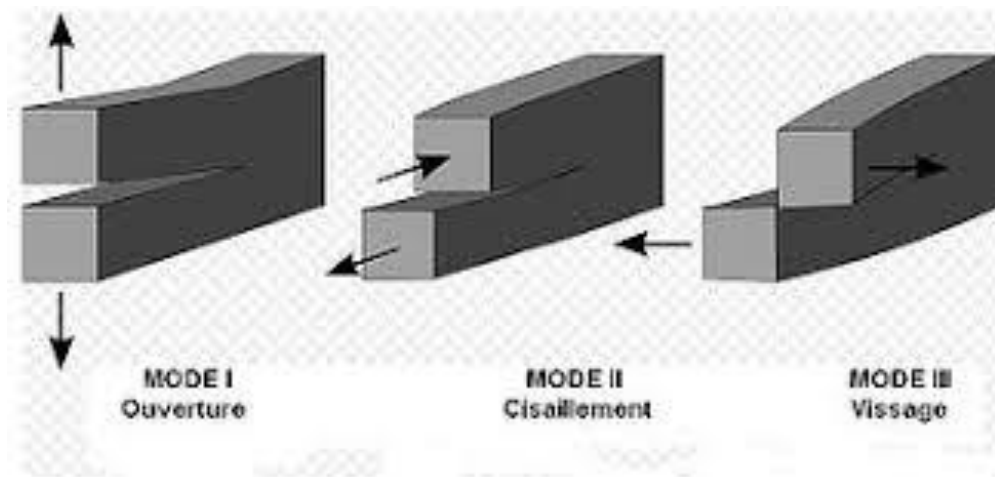


**Figure II.12:** les modes de fissuration élémentaires.

### II.9.2 Objectifs de l'essai

L'essai de ténacité a pour objectif de déterminer plusieurs paramètres mécaniques telle que :

**-facteur d'intensité des contraintes :**

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{II.22})$$

**Avec :**

$K_I$ : Facteur d'intensité des contraintes en  $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ .

$Y$  : facteur correctif qui tient compte de la géométrie de la pièce fissurée.

$\sigma$  : est la contrainte appliquée à la pointe de la fissure.

$a$  : est la longueur de la fissure.

**-champ de contrainte à proximité de la fissure :**

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (\text{II.23})$$

**Avec :**

$\sqrt{2\pi r}$ : singularité de contraintes en  $\frac{1}{\sqrt{r}}$ .

$f_{ij}(\theta)$ : Fonction angulaire.

K : facteur gouvernant.

-Taux de restitution de l'énergie :

$$G_{IC} = \frac{KIC^2}{E_1} \quad (\text{II.24})$$

$G_{IC}$ : Taux de restitution  $\frac{J}{m^2}$ .

**KIC** : facteur d'intensité

$E_1$ :

-la ténacité :

$$K_c = \frac{W}{S} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$K_c$ : Ténacité en  $\frac{J}{m^2}$

$W$ :Energir absorbée par le matériau en J

$S$ :Surface de la zone sous la courbe contrainte-déformation jusqu'au point de rupture en  $m^2$  .

### II.9.3 Principe de l'essai

Une éprouvette pré-fissurée est placée dans une machine d'essai avec l'application de la charge de manière contrôlée de différentes manières, telles que la traction, la flexion ou bien la torsion, selon les propriétés du matériau et l'objectif de l'essai. Quand la charge est appliquée, on capture mesurée la contrainte et la déformation de l'échantillon, ce qui permet de tracer la courbe contrainte-déformation.

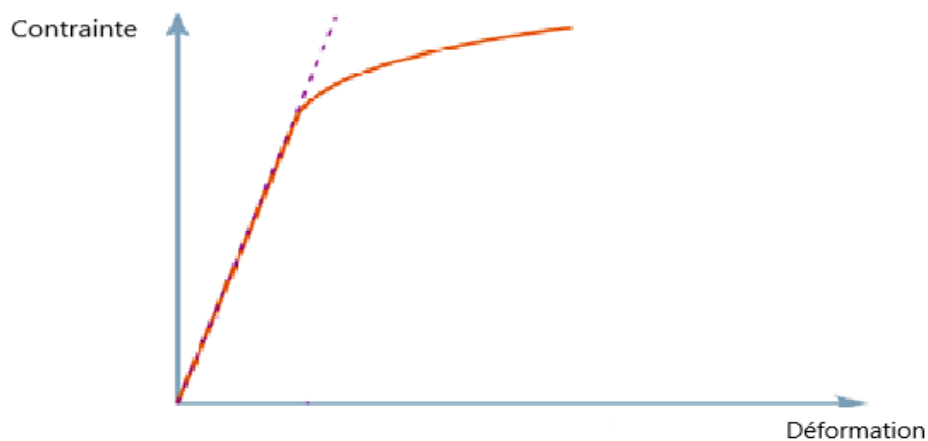


**Figure II.13:** courbe de contrainte-déformation.

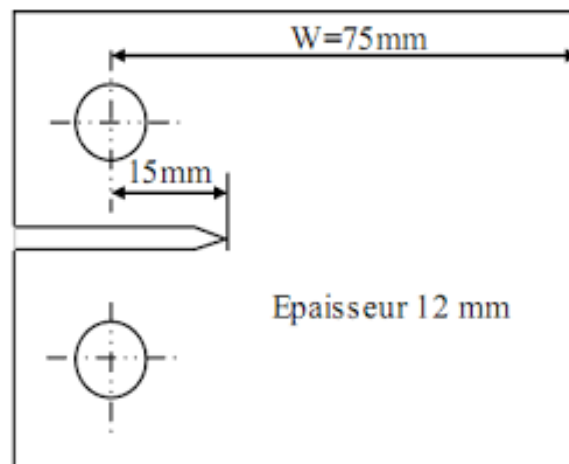
D'après la courbe de ténacité on peut comprendre le comportement d'un matériau en présence de fissures :

Phase élastique : là où le matériau se déforme de manière linéaire réversible (retrouve sa forme initiale quand la charge est relâchée), aussi stable.

Phase plastique : cette phase est Contrairement à la phase élastique où le matériau se déforme de manière permanente irréversible.

#### II.4 Éprouvettes

Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-fissurée obtenue en général par une sollicitation en fatigue.

**Figure II.14:** éprouvette pré-fissurée.

#### II.10 La relation entre la résilience et la ténacité [33]

La résilience ainsi que la ténacité représentent deux caractéristiques mécaniques essentielles des matériaux.

La mesure de la capacité d'un matériau à résister à la propagation de fissures est plus précise avec l'essai de ténacité. Cependant, les essais pour déterminer le facteur d'intensité des contraintes KIC sont longs et coûteux par rapport à l'essai de résilience. Pour cette raison, les ingénieurs ont simplifié ce problème en reliant la ténacité à la résilience, car cette dernière est plus simple et moins coûteuse.

## II.11 Phénomène d'écrouissage

### II.11.1 Définition [34],[35]

Le phénomène d'écrouissage se réfère au durcissement et augmentation de la résistance d'un matériau métallique suite à une déformation plastique. Lorsque le métal est soumis à des contraintes mécaniques qui provoquent une déformation permanente, les dislocations dans la structure cristalline du matériau se déplacent et s'accumulent, rendant plus difficile pour elles de se déplacer ultérieurement. Cela résulte en une augmentation de la résistance du matériau à la déformation ultérieure, ce qui le rend plus dur et plus résistant.

### II.11.2 Courbe et coefficient d'écrouissage

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes, l'écrouissage peut être évalué à partir des courbes de traction. **La figure II.9** représente une courbe typique contrainte-déformation.

Une partie parabolique *AB* de cette courbe peut être représentée par une forme empirique qui établit une relation entre la contrainte vraie  $\sigma$  et la déformation relative  $\epsilon$ . La formulation la plus couramment employée est celle de Lüduik :

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot (\epsilon)^n \quad (\text{II.26})$$

Où :

$\sigma_0$  Et  $k$  sont des constantes du matériau.

$n$  : est le coefficient d'écrouissage.

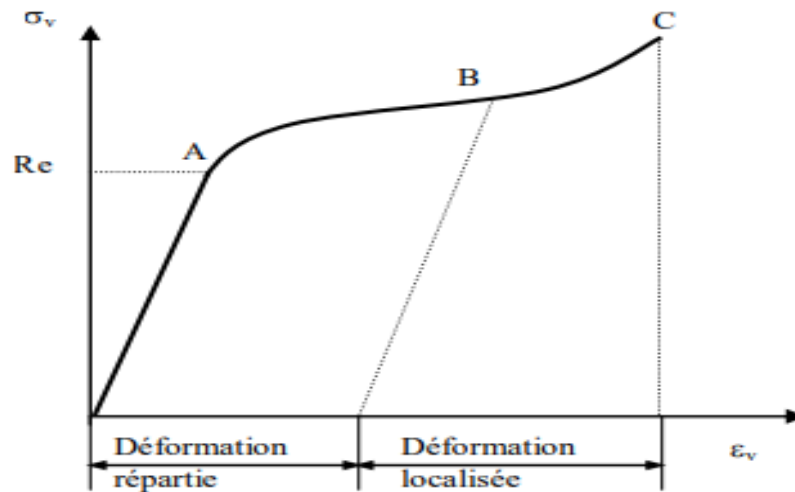


**Figure II.15:** phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction.

Le coefficient d'écrouissage est une mesure de la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique répartie de manière homogène, ainsi que sa capacité à distribuer uniformément cette déformation.

Ce coefficient varie en fonction du matériau et du traitement qu'il a subi. Habituellement, on observe :

$$0,1 \leq n \leq 0,4$$

Si :

- $n = 0,1$  : indique une faible consolidation du matériau.
- $n = 0,4$  : témoigne d'une forte consolidation du matériau.
- $n = 0$  : signifie qu'aucune consolidation n'a lieu, donc le matériau est parfaitement plastique.

Il est pratique de représenter la courbe rationnelle en utilisant des coordonnées logarithmiques pour mettre en avant le coefficient d'écrouissage.

Dans cette situation, la courbe :  $\ln \sigma_v = f(\ln \varepsilon_v)$  forme une droite avec une pente  $n$  [15].

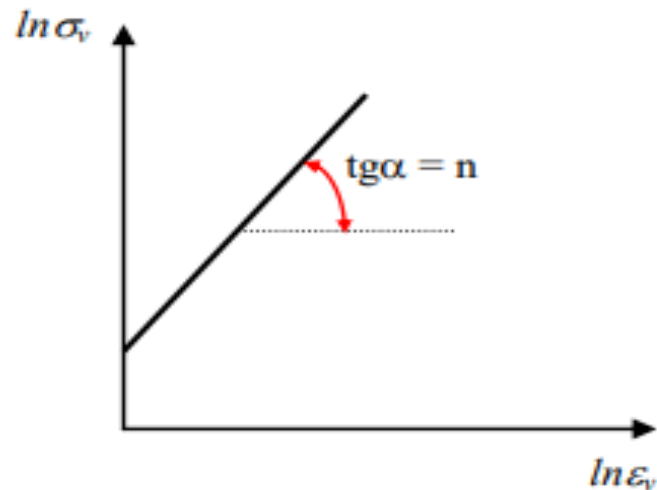


**Figure II.16 :** Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.[15]

## II.12 Matériaux étudiés

### II.12.1 caractéristiques des tubes

Le matériau des tubes étudiés est en acier inoxydable. Il se présente sous forme d'une barre de section circulaire de diamètre extérieure  $D_e=38$  mm, diamètre intérieure  $D_i = 35$ mm, sa longueur est  $L= 6$  m, et d'épaisseur  $e= 1.5$ mm.

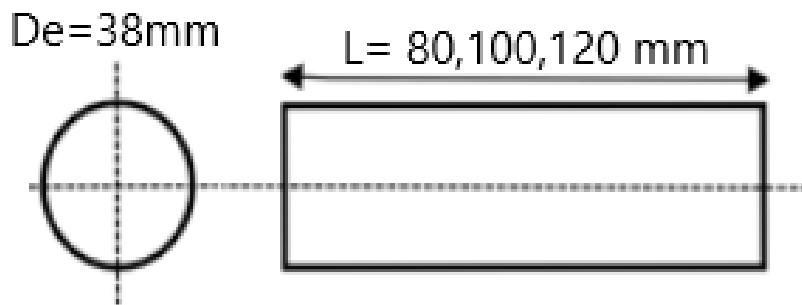


**Figure II.17 :** Géométrie et dimension de l'éprouvette utilisée dans l'essai de compression.

## II.13 Méthodes expérimentales

### II.13.1 Préparation des éprouvettes

Premièrement on a découpé la barre de  $L=6000$  mm en trois barres de longueur  $l=2000$  mm à l'aide d'une scie mécanique fortement lubrifiée, à partir d'une de ces barres on a découpé

sur un tour universel trois échantillons de différentes longueur  $l_1=120\text{mm}$ ,  $l_2=100\text{mm}$ ,  $l_3=80\text{mm}$ .



**Figure II.18 :** les trois éprouvettes découpées.

Ensuite, un dressage des surfaces brutes a été effectué sur le même tour également lubrifié dans le but d'obtenir des surfaces lisses bien usinées.



**Figure II.19 :** dressage des surfaces brutes à l'aide d'un tour.

- Les éprouvettes de différentes longueurs sont soumises à l'essai de compression afin de déterminer celle qui présente la meilleure résistance et le meilleur mode de déformation sur une machine de compression (Zwick/Roell).

### II.13.2 L'essai de compression

La machine Zwick/Roell également connue sous le nom de machine d'essai universelle, est une gamme spécifique utilisée dans diverses industries : l'ingénierie, l'aérospatiale, l'automobile et la construction pour effectuer l'essai de compression, flexion, traction, pour caractériser le comportement d'un matériau sous une charge appliquée de 5000N à 100000N (la résistance, la limite élastique, la limite de rupture, module d'élasticité). Cette machine est associée au logiciel interactif de Zwick/Roell, qui fournit les résultats de l'essai sous la forme d'un diagramme de force-déformation.



**Figure II.20:** machine et logiciel Zwick/Roell.

### II.13.3 Résultats expérimentaux

Nous donnons dans ce qui suit les résultats obtenus au cours des essais de compression des différentes éprouvettes. La **figure II.21** montre les éprouvettes après l'essai de compression, on remarque que celles de 80mm et 100mm sont déformées selon le mode axisymétrique stable en formant un seul plis, par contre le mode de déformation pour les éprouvettes de 120mm est instable (un début de flambage du tube).

Trois essais de compression sont réalisés pour chaque longueur. Dans le cas des tubes avec  $L_1 = 120$  mm, nous représentons que les résultats de 2 essais ; le 3<sup>ème</sup> essai a mal marché.



**Figure II.21:** Les échantillons après l'essai de compression.

Nous avons effectué ces calculs afin de pouvoir tracer les courbes de contraintes en fonction du déplacement.

- **La contrainte normale :**

$$\sigma_N = \frac{F}{S_0} \quad (\text{II.27})$$

$\sigma_N$ : contrainte normale (Mpa)

F : force de compression (N)

$S_0$  : surface ( $\text{mm}^2$ )

- **La déformation normale :**

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{U}{L_0} \quad (\text{II.28})$$

$\varepsilon_N$ : déformation normale

U :déplacement

$L_0$ :allongement initiale

▪ **La contrainte :**

$$\sigma = \frac{F}{S} = \sigma_N(1 + \varepsilon_N) \quad (\text{II.29})$$

$\sigma$  : contrainte (Mpa)

$\sigma_N$ :contrainte normale

$\varepsilon_N$  :déformation normale

▪ **La déformation :**

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_N) \quad (\text{II.30})$$

$\varepsilon$  :déformation

$\varepsilon_N$ :déformation normale

Ci-dessous, nous présentons les courbes contrainte-déformation obtenues pour chaque cas d'éprouvette, en commençant par celles de 120 mm de longueur.

- **Courbe 120**

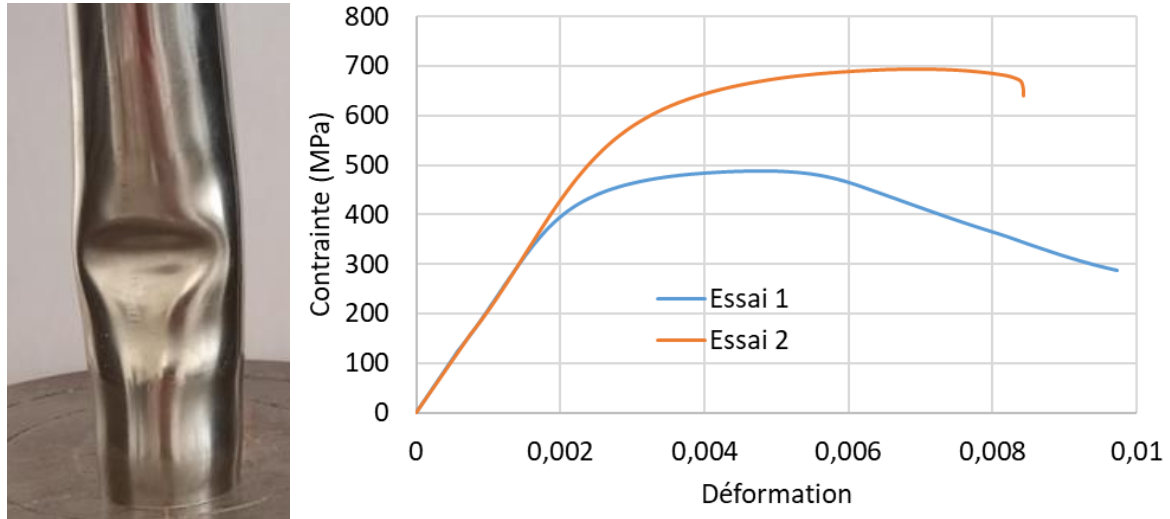


**Figure II.22 :** Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 120mm après déformation.

- Lors des essais de compression sur les éprouvettes de 120 mm, une éprouvette s'est rempou pendant l'essai, tandis que les deux autres ont continué à flamber instablement. Nous observons sur les courbes que ces deux éprouvettes présentent un comportement similaire, à l'exception des contraintes maximales qui varient entre elles.

- **Tubes de 80mm**

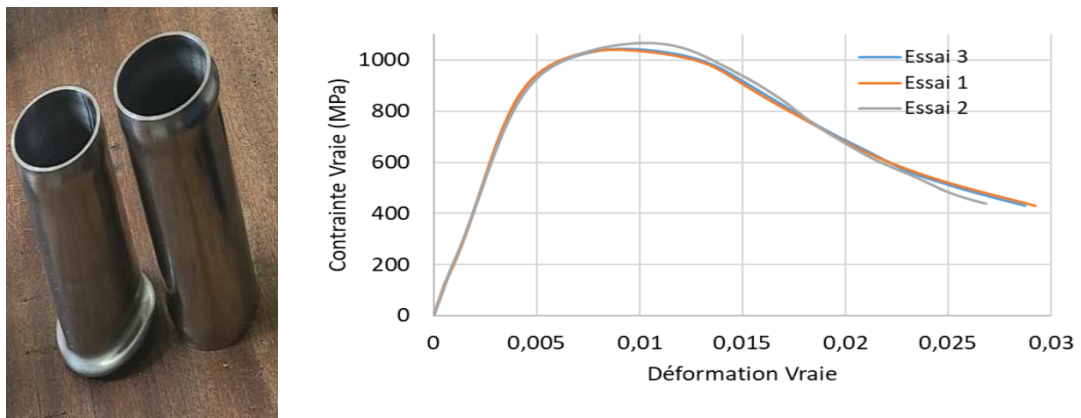


**Figure II.23:** Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 80mm après déformation.

- Ensuite, nous avons procédé aux essais de compression sur les éprouvettes de 80mm. Cette fois-ci, les éprouvettes ont présenté une déformation avec un mode stable en formant un seul lobe à l'extrémité du tube de 80mm. **La figure II.24** montre les trois courbes contrainte-déformation obtenues, qui sont assez similaires. Nous observons que la courbe du deuxième essai atteint une contrainte maximale plus élevée par rapport aux autres courbes. Cependant, comme nous l'avons constaté, celle qui présente le meilleur comportement est celle de l'essai 1 c'est pourquoi nous l'avons choisi.

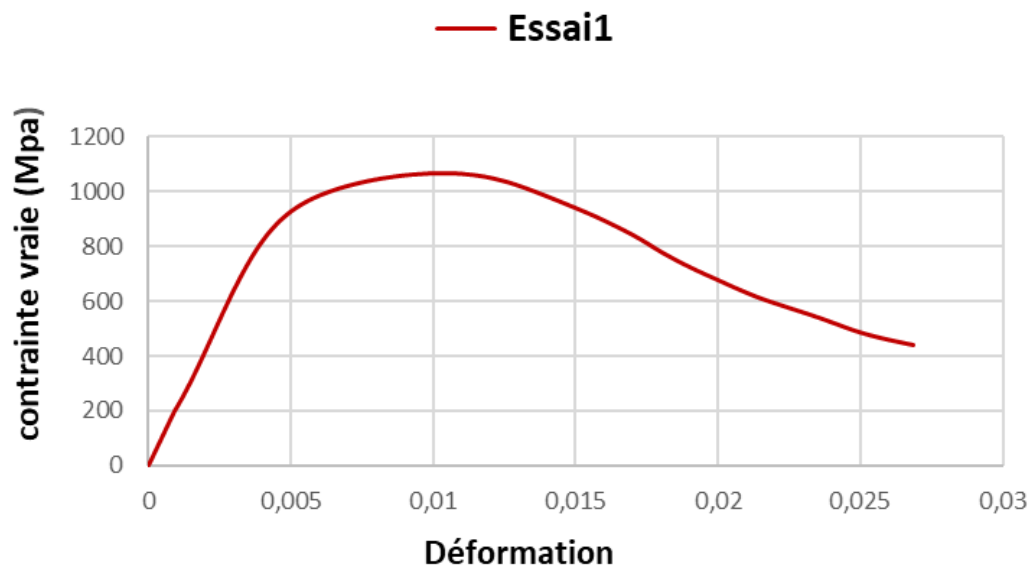


**Figure II.24:** courbe contrainte-déformation d'essai 1 tube 80 mm après déformation.

- **Tubes de 100mm**

Sur **la figure II.25**, nous illustrons les structures tubulaires de 100mm après déformation et la superposition des courbes contrainte-déformation obtenues lors de la compression de l'échantillon de 100mm.

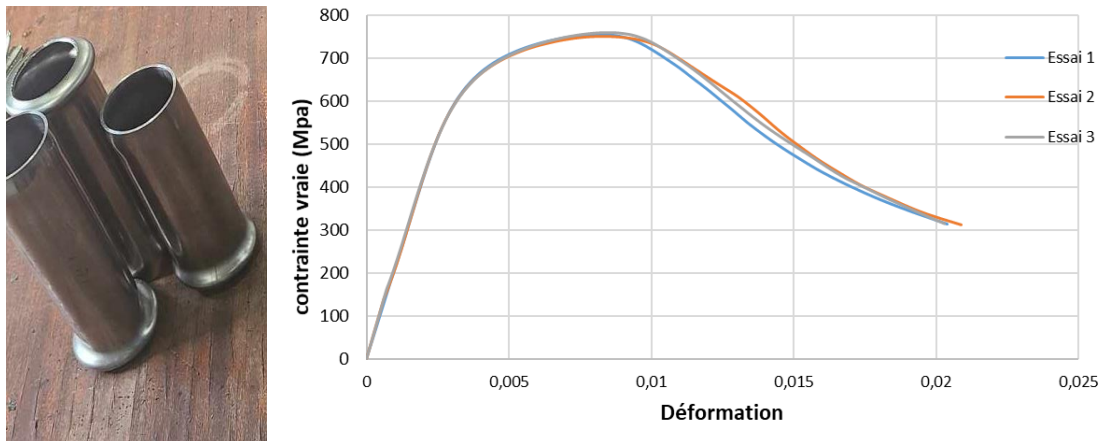


**Figure II.25:** Comparaison courbe contrainte-déformation de tube 100mm après déformation.

- Nous observons que les courbes sont très similaires et presque identiques. Au début de l'essai, les éprouvettes montrent un comportement élastique linéaire similaire, ce qui correspond à la partie réversible. En théorie, la pente de cette partie de la courbe représente le module d'Young  $E$ , qui constitue la limite élastique  $R_e$ . Dans la deuxième phase de l'essai, caractérisée par un comportement irréversible, les éprouvettes perdent leur linéarité car la déformation élastique est suivie de la déformation plastique, laquelle continue à augmenter jusqu'à une contrainte de 750 MPa. Ensuite, la contrainte diminue jusqu'à environ 310 MPa.

Dans cette étude nous proposons d'étudier l'influence du nombre de la taille, de la forme et de l'orientation des perforations sur les courbes de capacité (F-U) des tubes. Nous avons fixé les surfaces totales de perforation à 0.3 % de la surface latérale  $S_t$  du tube pour tous les tubes.

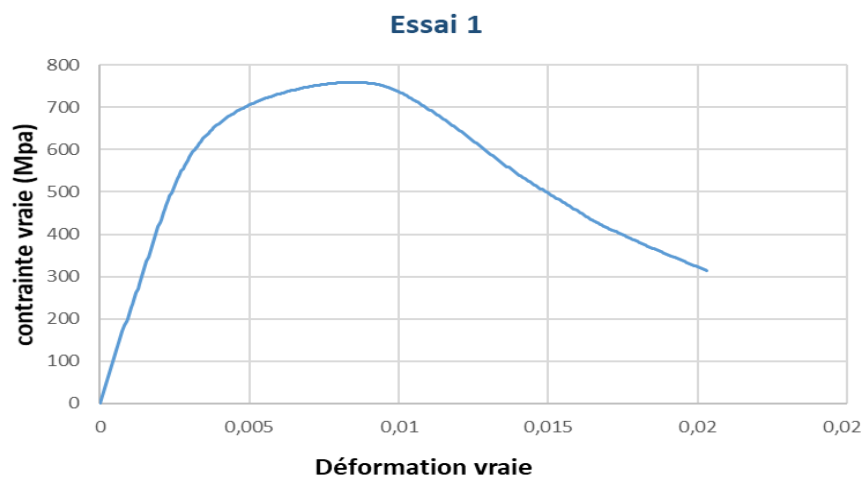


**Figure II.26:** courbe contrainte-déformation d'essai 1 tube 100mm après déformation.

### II.13.4 Comparaisons entre les résultats

Nous avons choisi de comparer les courbes contrainte-déformation des éprouvettes de différentes longueurs pour identifier celle présentant le meilleur comportement lors de l'essai de compression. Cette sélection nous guidera dans le choix de l'éprouvette à utiliser pour la suite des travaux.

Cette décision est cruciale pour garantir la fiabilité des résultats et orienter efficacement la suite de nos travaux expérimentaux. En analysant attentivement les données des courbes contrainte-déformation, nous pourrions déterminer avec précision quelle éprouvette offre les caractéristiques mécaniques les plus favorables, répondant ainsi aux critères de performance requis pour notre étude.

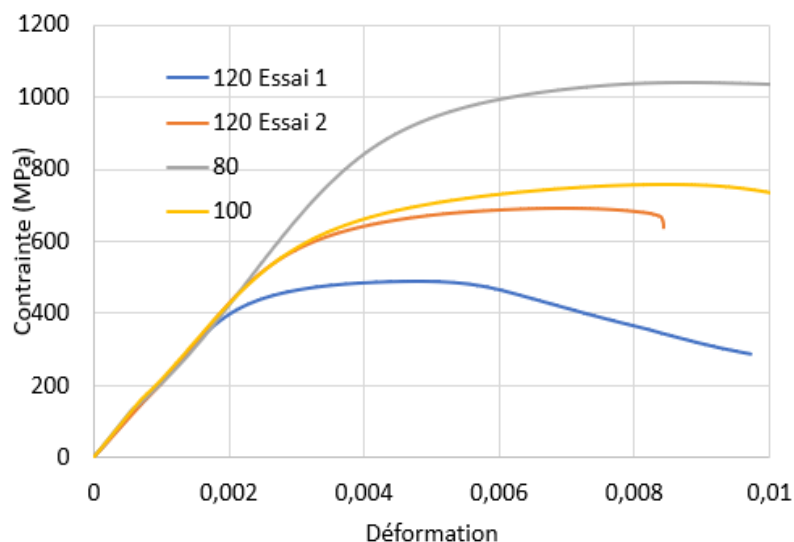


**Figure II.27:** Comparaison courbe contrainte-déformation choisies des éprouvettes après déformation.

- Après avoir comparé les courbes des éprouvettes précédemment sélectionnées, nous avons choisi la courbe du tube de 100 mm en raison de son comportement favorable par rapport aux autres éprouvettes. Nous avons donc décidé de poursuivre le reste du travail en utilisant le tube de 100 mm dans les étapes suivantes.

### II.14 calculs des perçages

Dans cette étude, nous avons déterminé la surface initiale du tube de référence. Ensuite, en appliquant un coefficient pour représenter la zone percée, nous avons calculé les surfaces des diverses configurations (trous, ellipses et rainures) nécessaires pour les opérations de

perçage des tubes. Nous avons principalement traité les trois orientations angulaires suivantes :  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , correspondant aux orientations verticales, horizontales et inclinées.

**La surface latérale de tube est**

$$S_l = \pi \cdot D_{ext} \cdot L \quad (II.31)$$

**Avec :**

$$L=100$$

$$D_{ext}=38$$

**AN :**

$$S_l = 3,1416 \cdot 38 \cdot 100$$

$$S_l = 11938,08 \text{ mm}^2$$

- **La Surface perforée avec 0,3% fixé**

$$S_p = S_l \cdot 0,003 \quad (II.32)$$

$$S_p = 11938,08 \cdot 0,003$$

$$S_p = 35,81424 \text{ mm}^2$$

**a) Cas de trous circulaire**

$$S_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad (II.33)$$

**Nous avons :  $S_{Tr} = S_c$**

**Donc :** 
$$d = \sqrt{\frac{S_{Tr}}{\pi}} \cdot 4$$

| Nombre<br>Faces/Lignes | Surface<br>troué(mm <sup>2</sup> ) | Diamètre (d, mm) | Rayon (R, mm) |
|------------------------|------------------------------------|------------------|---------------|
| 2faces /1ligne(2trou)  | 17,907                             | 4,774            | 2,387         |
| 4faces /1ligne(4trou)  | 8,953                              | 3,376            | 1,688         |
| 2faces /2ligne(4trou)  | 8,953                              | 3,376            | 1,688         |
| 4faces /2ligne(8trou)  | 4,476                              | 2,387            | 1,193         |

Tableau II.2 : les résultats de calcul pour la forme cercle.

## b) Cas de l'ellipse allongée verticale

Nous avons :  $S_{el} = \pi . a . b$  (II.34)

Et  $a = 3b$ ,  $S_{Tr} = S_{el}$

Donc :  $S_{Tr} = \pi . 3b^2$

$$b = \sqrt{\frac{S_{Tr}}{\pi . 3}}$$

| Nombre<br>Faces/Lignes | Surface<br>troué(mm <sup>2</sup> ) | A (mm) | b(mm) |
|------------------------|------------------------------------|--------|-------|
| 2faces /1ligne(2trou)  | 17,907                             | 4,11   | 1,378 |
| 4faces /1ligne(4trou)  | 8,953                              | 2,922  | 0,974 |
| 2faces /2ligne(4trou)  | 8,953                              | 2,922  | 0,974 |
| 4faces /2ligne(8trou)  | 4,476                              | 2,067  | 0,689 |

Tableau II.3 : les résultats de calcul pour la forme de l'ellipse allongée verticalement.

## c) Cas de l'ellipse aplatie horizontale

Nous avons :  $S_{el} = \pi . a . b$  (II.35)

Et  $a = 3b, S_{Tr} = S_{el}$

Donc :  $S_{Tr} = \pi . 3b^2$

$$b = \sqrt{\frac{S_{Tr}}{\pi . 3}}$$

| Nombre<br>Faces/Lignes | Surface<br>troué(mm <sup>2</sup> ) | a(mm) | b(mm) |
|------------------------|------------------------------------|-------|-------|
| 2faces /1ligne(2trou)  | 17,907                             | 1,378 | 4,11  |
| 4faces /1ligne(4trou)  | 8,953                              | 0,974 | 2,922 |
| 2faces /2ligne(4trou)  | 8,953                              | 0,974 | 2,922 |
| 4faces /2ligne(8trou)  | 4,476                              | 0,689 | 2,067 |

**Tableau II.4 :** les résultats de calcul pour la forme de l'ellipse allongé horizontalement.

## c) Cas de rainure rectangulaire

Nous avons :  $S_r = L . l$  (II.36)

Et  $L = 2l$  donc :  $S_r = 2l^2$

Avec :  $S_{Tr} = S_r$

$$l = \sqrt{\frac{S_{Tr}}{2}}$$

**1.Verticalement**

| <b>Nombre Faces/Lignes</b>   | <b>Surface troué(mm<sup>2</sup>)</b> | <b>l(mm)</b> | <b>L(mm)</b> |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>2faces /1ligne(2trou)</b> | 17,907                               | 2,992        | 5,984        |
| <b>4faces /1ligne(4trou)</b> | 8,953                                | 2,115        | 4,23         |
| <b>2faces /2ligne(4trou)</b> | 8,953                                | 2,115        | 4,23         |
| <b>4faces /2ligne(8trou)</b> | 4,476                                | 1,495        | 2,99         |

**Tableau II.5 :** les résultats de calcule pour la forme de rainures verticalement.**2.Horizontalement**

| <b>Nombre Faces/Lignes</b>   | <b>Surface troué(mm<sup>2</sup>)</b> | <b>l(mm)</b> | <b>L(mm)</b> |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>2faces /1ligne(2trou)</b> | 17,907                               | 5,984        | 2,992        |
| <b>4faces /1ligne(4trou)</b> | 8,953                                | 4,23         | 2,115        |
| <b>2faces /2ligne(4trou)</b> | 8,953                                | 4,23         | 2,115        |
| <b>4faces /2ligne(8trou)</b> | 4,476                                | 2,99         | 1,495        |

**Tableau II.6:** les résultats de calcule pour la forme de rainures horizontalement.

Nous avons effectué ces calculs dans le but de réaliser des simulations numériques sur les perforations de diverses formes effectuées sur le tube de 100 mm. Dans la section suivante, nous les exécuterons.

## Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons caractérisé expérimentalement trois éprouvettes en acier inoxydable. Des tests de compression ont été réalisés sur les tubes pour étudier l'impact de la charge sur le déplacement et évaluer la capacité d'absorption d'énergie face aux chocs. Nous avons pu post-traiter les courbes Force-Déplacement à l'aide du logiciel Zwick/Roell disponible sur la machine de traction. Nous avons aussi tracé les courbes Contrainte-Déformation dans le but d'extraire les propriétés matériau à introduire dans le code de calcul Abaqus afin de réaliser les simulations. Les résultats de ces simulations seront présentés dans le chapitre 3, notamment, la comparaison des courbes expérimentale et numérique afin de valider les paramètres matériau du modèle que nous utilisons dans **Abaqus**.

### *Chapitre III :*

### *Simulations et résultats*

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre se concentre sur la modélisation numérique du comportement mécanique de tubes en acier inoxydable soumis à une charge de compression axiale. La première partie concerne la création d'un modèle de calcul utilisant le logiciel « Abaqus », que nous avons désigné comme

« Le tube de référence ». Ensuite nous abordons l'optimisation du maillage et du nombre d'élément dans l'épaisseur, suivie de l'étude des effets de perçage sur les tubes suivant selon différentes configurations. Enfin, les résultats pour chaque cas sont présentés, incluant une comparaison avec les données expérimentales à la fin de ce chapitre.

### **III.2 Présentation de logiciel Abaqus**

Abaqus est un logiciel de calcul et de simulation numérique utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Créé en 1978, il a été développé par Hibbitt, Karlsson & Sorensen. Il est largement utilisé dans les industries automobile, aéronautique, ainsi que dans les domaines mécanique et électrique, et également dans les secteurs thermiques pour résoudre des problèmes dynamiques et statique.

#### **III .2.1 Les composants de Abaqus**

Il se compose de trois produits principaux :

- ✓ **ABAQUS/Standard** : C'est un programme généraliste qui utilise un schéma d'intégration implicite statique.
- ✓ **ABAQUS/Explicit** : C'est un programme adapté aux problème dynamiques ou quasi-statique, linéaires et non- linéaires en utilisant un schéma d'intégration explicite.
- ✓ **ABAQUS/CAE** : C'est une interface intégrée de visualisation et de modélisation.

#### **III.2.2 Les éléments utilisés dans ABAQUS**

- ✓ **Les éléments unidimensionnels (1D)** : barre, poutre.
- ✓ **Les éléments bidimensionnels (2D)** : plaque en flexion, coques courbes (triangle, rectangle, carré, cercle).
- ✓ **Les éléments tridimensionnels (3D)** : les éléments de forme tétraédrique, cubique (C3D8, C3D20), hexaédrique.
- ✓ **Les éléments axisymétriques** : Cylindre, sphère.
- ✓ **Les autres éléments** : ressorts, amortisseurs.

### III.2.3 Les modules

Dans ABAQUS CAE les fonctionnalités sont organisées en modules, chacun contient les outils correspondants :

**Le module "PART"** : le module part il offre des outils pour la création et l'assemblage des pièces (dessin 2D)

**Le module "PROPERTY"** : Ce module permet de définir les caractéristique mécaniques et physique des matériaux, telles que : la densité, la rigidité, conductivité thermique.

**Le module "ASSEMBLY"** : le module permet l'assemblage des pièces (orienter et connecter les pièces entre elles), également définir les conditions aux limites, et les interactions entre elles.

**Le module "STEP"** : Ce module permet de décrire toutes les étapes et les commandes pour le post-traitement c'est à dire la période durant laquelle une force est applique ainsi que sa durée.

**Le module "INTERACTION"** : le module permet de définir toutes les interactions entre les diverses parties et zones de module qu'elles soient de nature, mécanique, thermique ...

**Le module "LOAD"** : Ce module permet de spécifier toutes les sollicitations (les pressions, les chargements, les forces, les déplacements), et celle-ci dépendent des steps de chargement

Exemple : une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

**Le module "MESH"** : Ce module comprend toutes les fonctionnalités et les outils nécessaires pour crée un maillage élément fini sur un assemblage.

**Le module "JOB"** : Ce module permet de configurer et d'exécuter les analyses des tâches précédents.

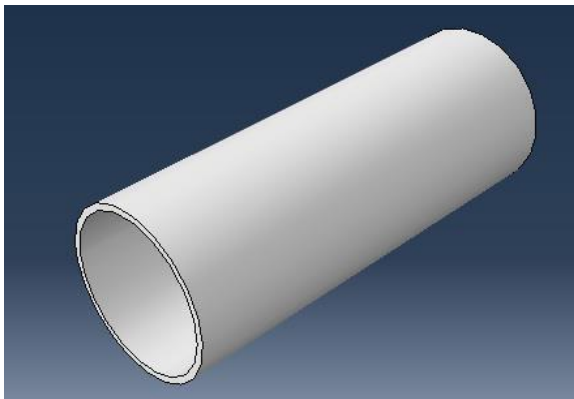
**Le module "VISUALIZATION"** : Ce module est une fonctionnalité qui permet aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les résultats, ainsi que de créer des présentations graphiques (courbe de charge, déformation).

- **La première partie**

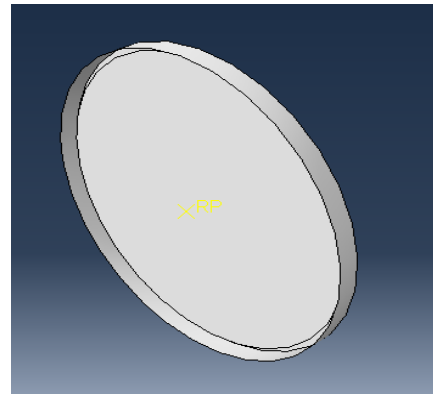
Nous avons suivi ces étapes pour créer un tube déformable en acier de 100mm de longueur et pour analyser son comportement sous chargement axial.

**Le module « Part »**

Nous avons un système qui se compose d'un ensemble constitué d'un tube déformable, ainsi que de deux corps rigides. L'un des corps est encastré, tandis que l'autre exerce une force qui comprime axialement le tube.



a : Tube en acier déformable



b : disque rigide

**Figure III.1 :** Module part des corps.

**Le module « property »**

Nous avons saisi les paramètres mécaniques de : densité, d'élasticité, de plasticité dans le module des propriétés d'Abaqus.

**Le module « assembly »**

Nous avons créé le contact entre le tube et les disques, ensuite nous avons obtenus cet ensemble ce que montre la figure III.2.

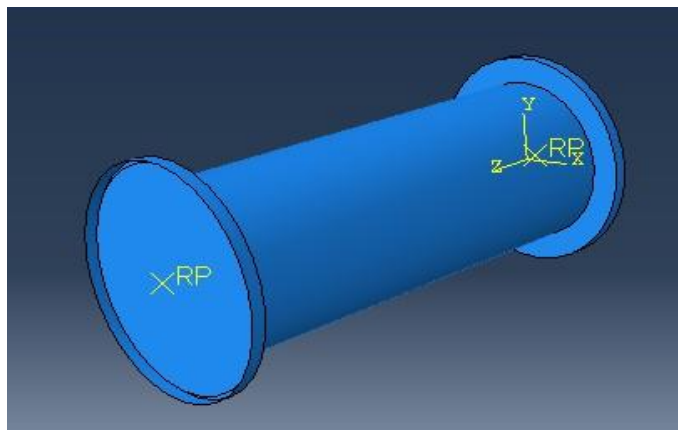


**Figure III.2 :** Ensemble (tube-disque).

**Le module « Step »**

Nous avons énuméré toutes les étapes et les instructions concernant le post-traitement des données, en particulier en ce qui concerne la période de temps pendant laquelle une force est appliquée.

**Le module « Interaction »**

Nous avons créé le contact entre les divers composants du modèle.

**Le module « Load »**

Nous avons défini le chargement axial sur la partie mobile, aussi la partie où l'ensemble est encastré.

**Le module « Mesh »**

Nous avons fait un maillage élément fini sur l'assemblage.

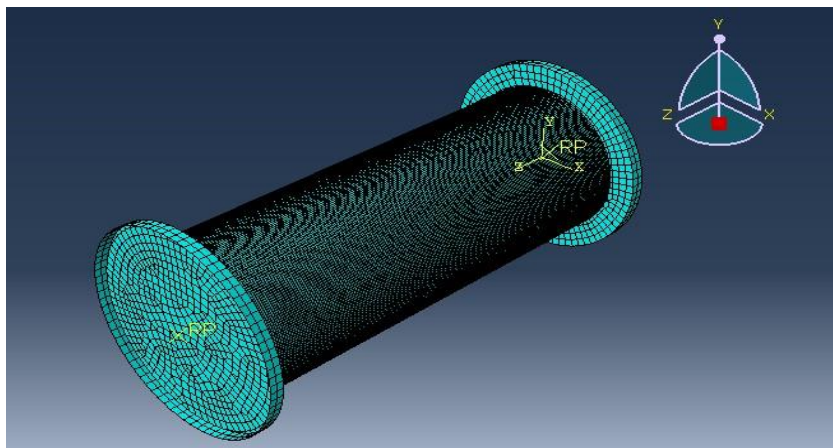


**Figure III. 3 :** le maillage de l'ensemble.

**Le module « Job »**

Nous avons analysé et fait les calculs nécessaires à l'aide de ce modèle pour tirer les résultats.

**Le module « visualization »**

Nous avons examiné les résultats numériques et graphique de cette simulation.

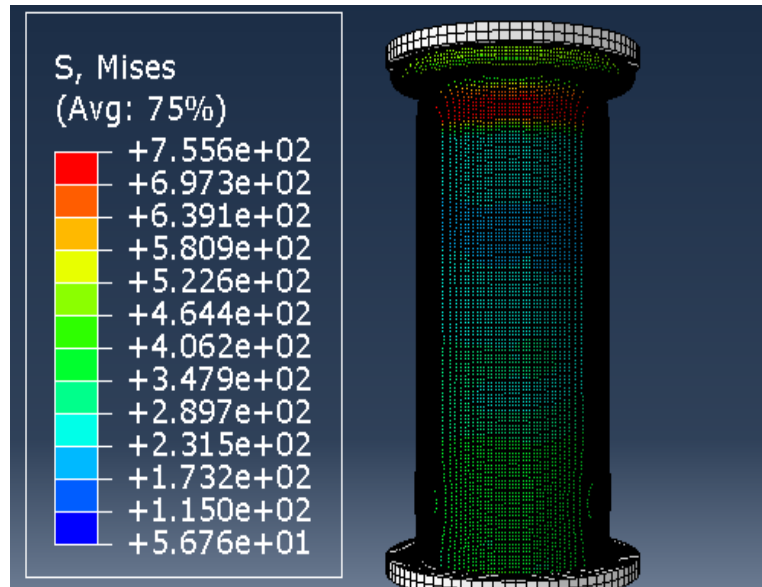


**Figure III.4 :** visualisation de tube après déformation.

Les résultats obtenus avec Abaqus sont donnés sur les figures III.4 et III.5, **la figure III.4** Montre la déformation de tube sous chargement axial en formant un pli. **La figure III.5** illustre la variation du déplacement en fonction du chargement :

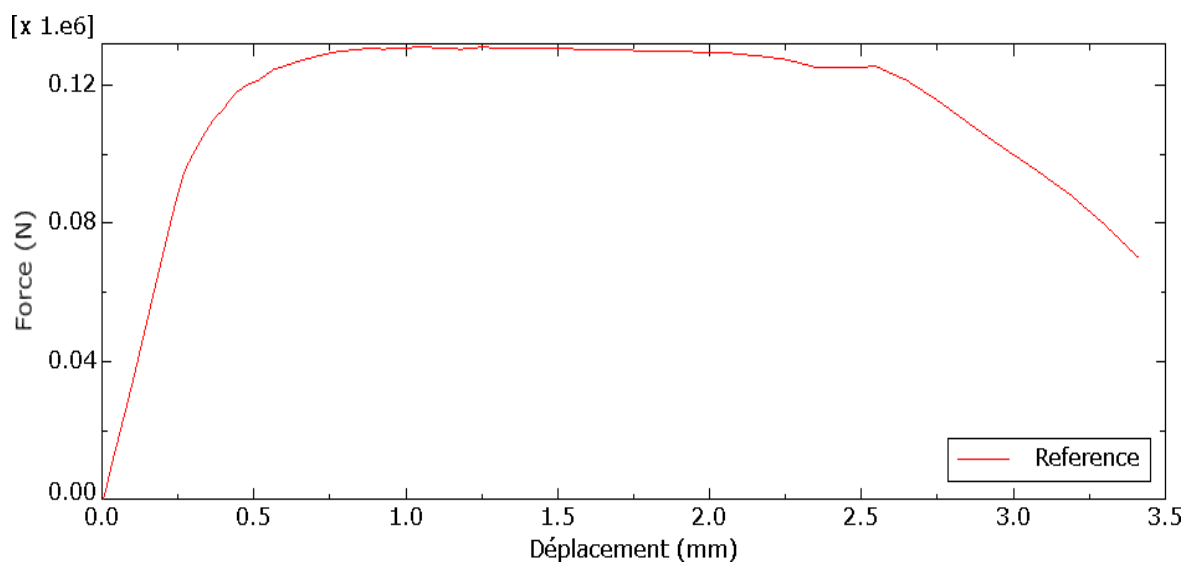


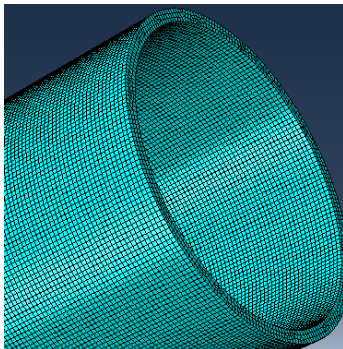
**Figure III.5 :** courbe force-déplacement obtenue.

### III.3 Etude de la convergence du maillage

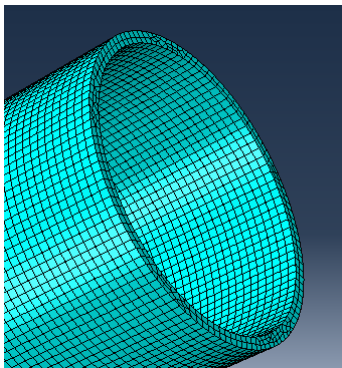
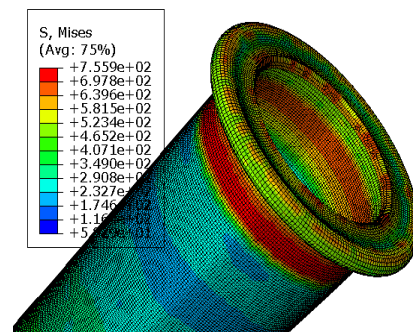
Avant d'entamer l'étude de la convergence du maillage, nous avons effectué un choix de la loi de comportement à utiliser pour réaliser les simulations. Abaqus dispose de deux catégories de lois pour simuler le comportement endommageable des aciers. La première, physique utilisant le modèle de Gurson-Tveergard-Needleman [36], [37], [38] et l'autre phénoménologique [39]. Nous avons donc opté pour un modèle phénoménologique élasto-plastique. Les paramètres matériau (élasticité et écrouissage) ont été pris des résultats expérimentaux présentés dans le chapitre précédent.

#### III.3.1 Optimisation de la taille globale du maillage

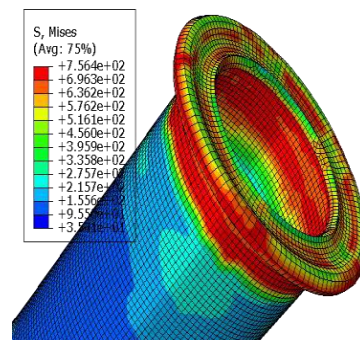
Dans cette partie nous avons seulement changé la taille de maillage de tube nous avons examiné 05 maillages pour étudier l'effet de maillage sur le comportement mécanique de l'acier étudié, afin de choisir le maillage approprié. Nous les illustrons dans **la figure III.6** avec la forme du lobe simulé.

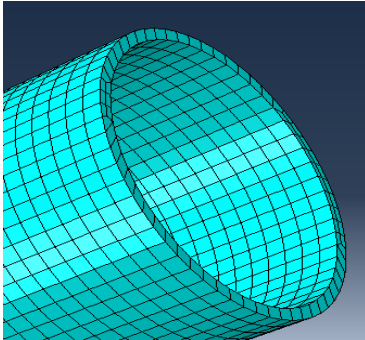


Maillage 0.5 mm

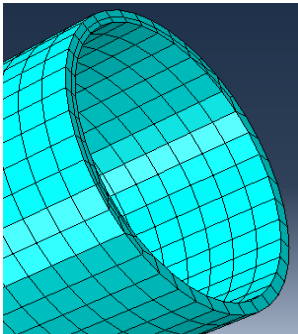
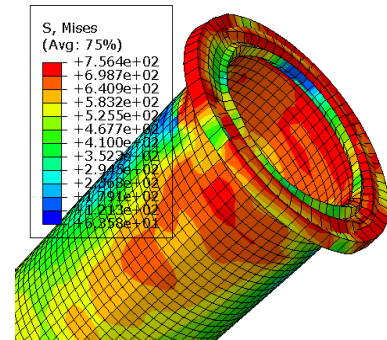


Maillage 1 mm

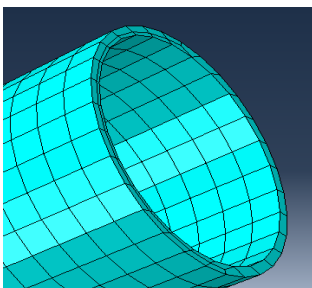
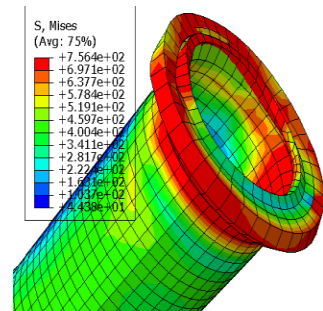




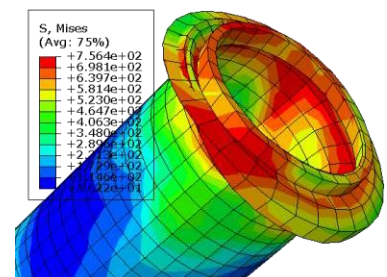
Maillage 2 mm



Maillage 3 mm



Maillage 4 mm





Maillage 5mm

**Figure III.6 :** déformation de profil des tubes pour les différentes tailles de maillage.

- Après l'étude réalisée précédemment sur le tube de référence, nous avons obtenu des courbes force-déplacement différentes pour les cinq tailles de maillage. La figure qui suit montre une comparaison entre ces courbes, nous y reproduisons selon l'évolution de la force en fonction du déplacement.

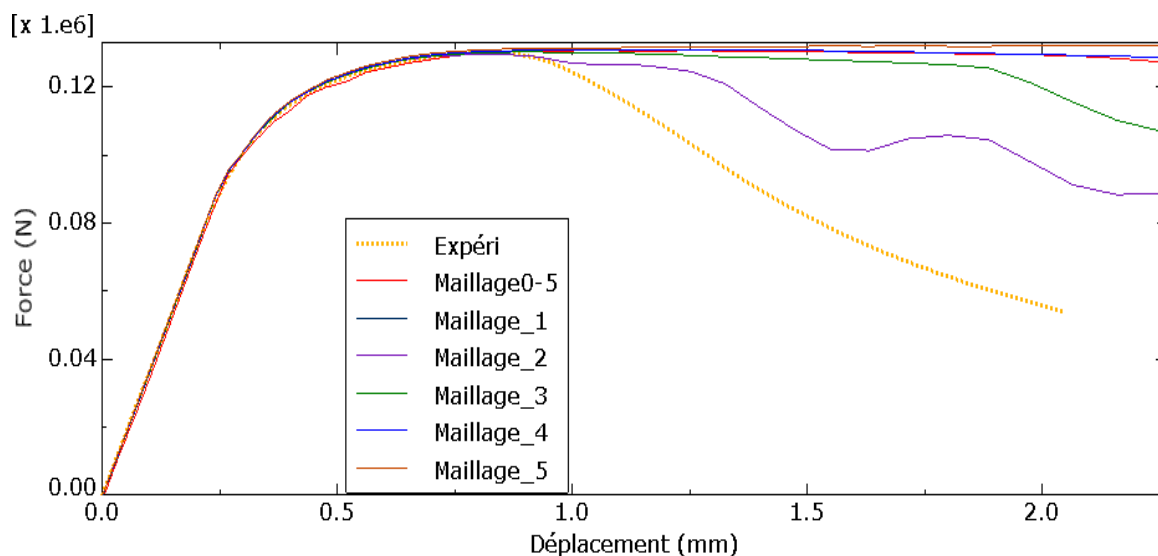


**Figure III.7 :** comparaison des courbes force-déplacement des différents maillages.

- Nous observons sur les courbes Force-Déplacement que la force maximale ainsi que le déplacement correspondant sont décrit correctement par toutes les simulations indépendamment de la taille de l'élément. Cependant, en analysant les déformées des tubes pour chaque maillage, nous décidons d'opter pour le maillage ayant une taille d'élément de 0,5mm. En effet, les simulations avec les maillages de 3, 4 et 5mm prédisent la formation du lobe loin du plateau contrairement aux résultats obtenus expérimentalement. Dans le cas des maillages de 1 et 2mm, la forme du lobe est

différente de celle obtenue expérimentalement.

### III .3.2 Influence du nombre d'élément sur l'épaisseur

Pour étudier l'effet du nombre de couches d'éléments sur l'épaisseur sur le comportement mécanique des tubes, nous avons testé 3 différents cas :3,4 et 5 couches d'éléments selon l'épaisseur.

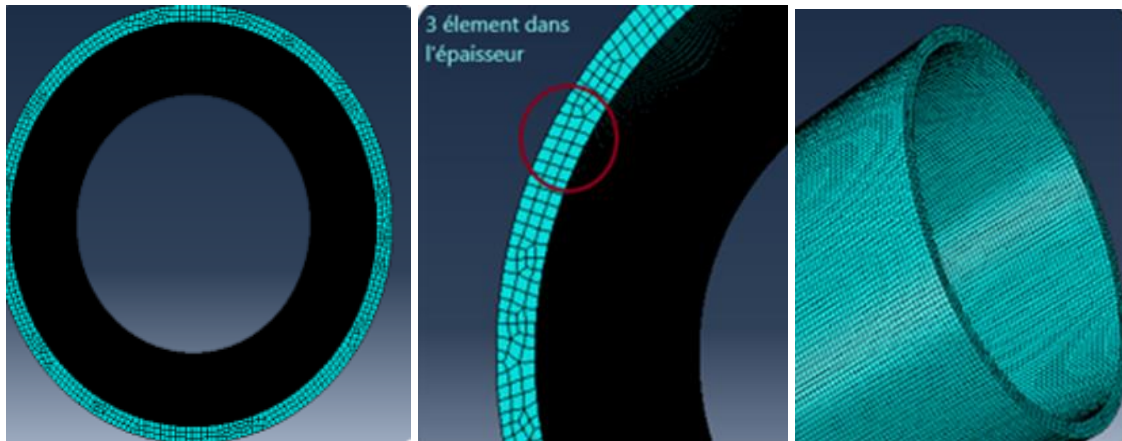


Figure III.8 : « 3 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

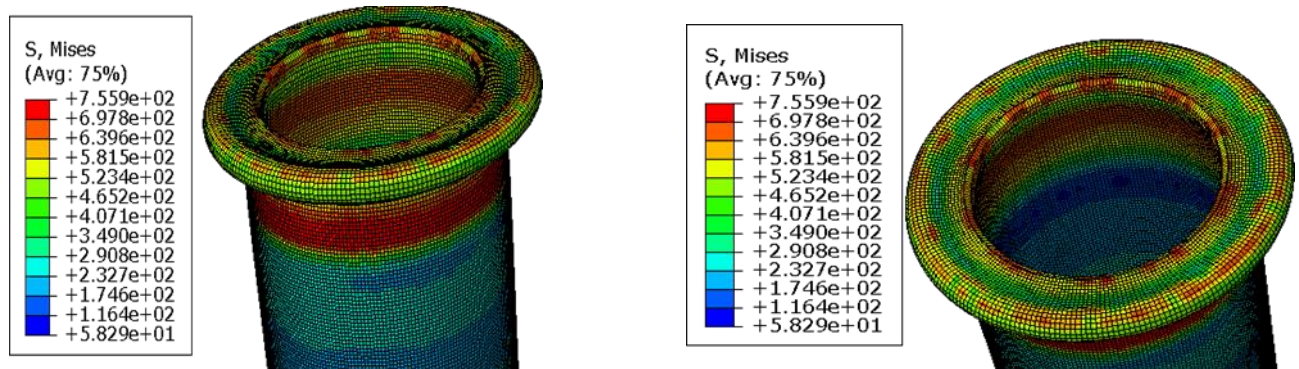


Figure III.9 : Contour des contraintes de Von mises sur « 3 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

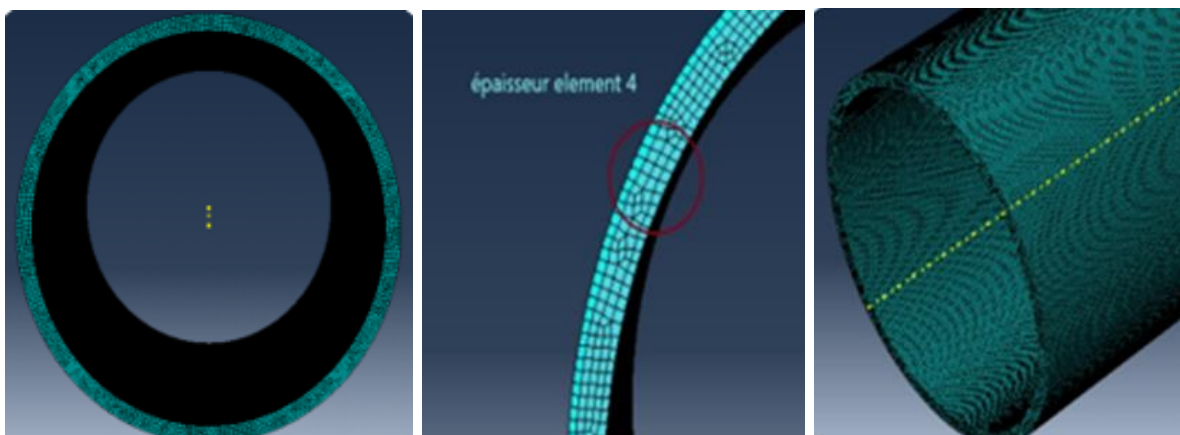


Figure III .10 : « 4 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

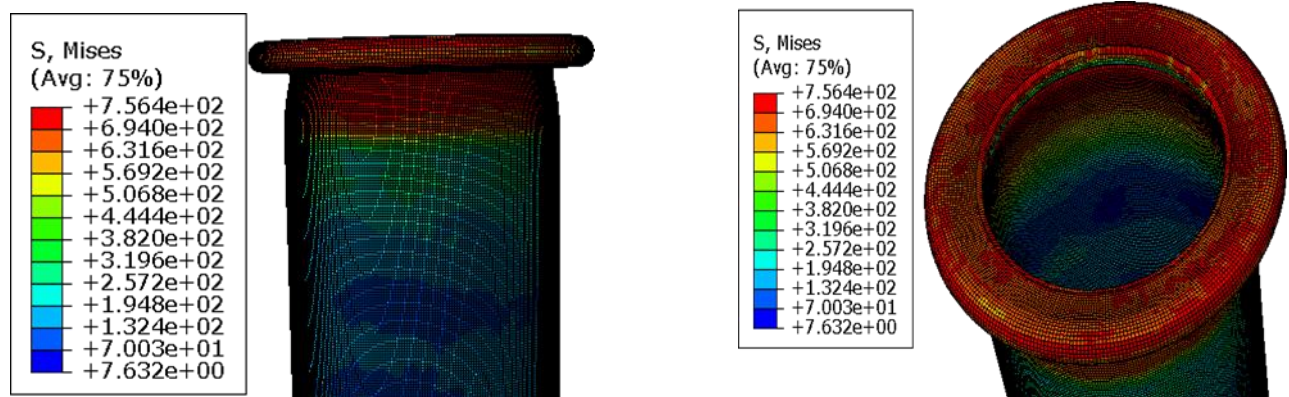


**Figure III .11 :** Contour des contraintes de Von mises sur « 4 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

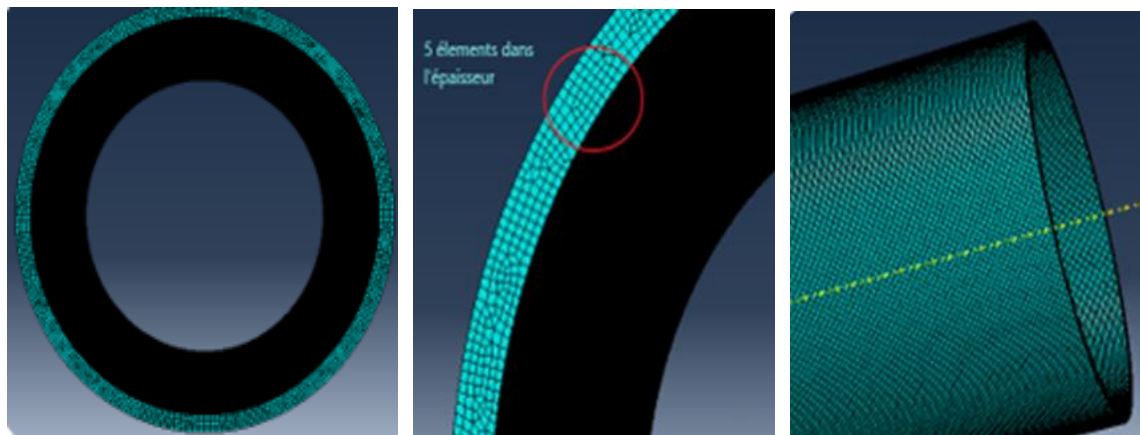


**Figure III.12 :** « 5 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

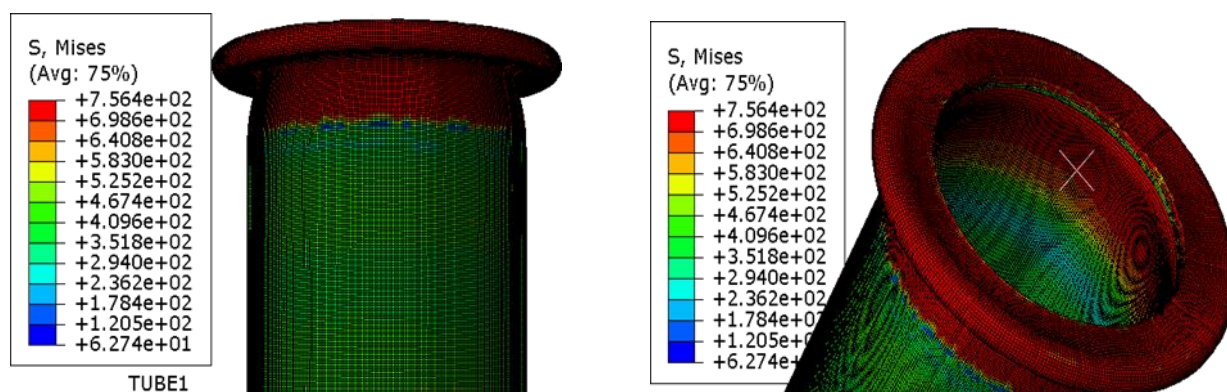


**Figure III.13 :** Contour des contraintes de Von mises sur « 5 » couches d'éléments selon l'épaisseur.

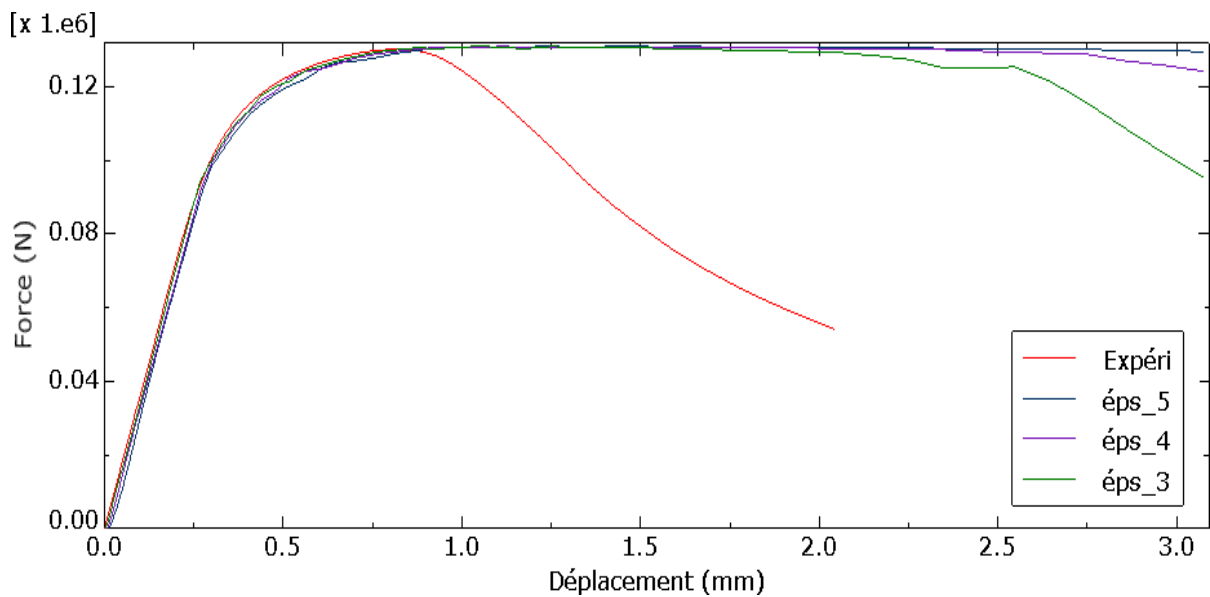


**Figure III.14:** Comparaison des courbes force-déplacement expérimentale avec celles numériques de l'épaisseur « 3,4,5 ».

- Nous avons comparé les courbes expérimentale et numériques avec 3,4 et 5 couches d'éléments. Nous avons constaté une faible influence de ces nombres de couches sur la force maximale. De plus sur la figure III.14 la courbe avec 3 couches est proche de celle de l'expérimentale, Nous avons donc choisi ce maillage pour continuer la suite de notre travail.

### III.4 La troisième partie : écrasement axial des tubes perforés.

Après validation du modèle numérique (Maillage, propriétés matériaux) comparaison avec les résultats expérimentaux d'écrasement des tubes, nous abordons dans cette section l'effet des perforations sur les courbes de capacités (F-U).

#### III.4.1 Les trous circulaires

Tout d'abord, nous avons perforer le tube avec des trous circulaire (2 à 8 trous) selon le cas, Le maillage de 0,5 est resté constant pour permettre la comparaison des résultats.

Nous donnons dans la partie un détail des perforations des maillages et des résultats de la déformation pour chaque cas.

##### III.4.1.1 Les éprouvettes à deux trous (2 faces / 1 ligne)

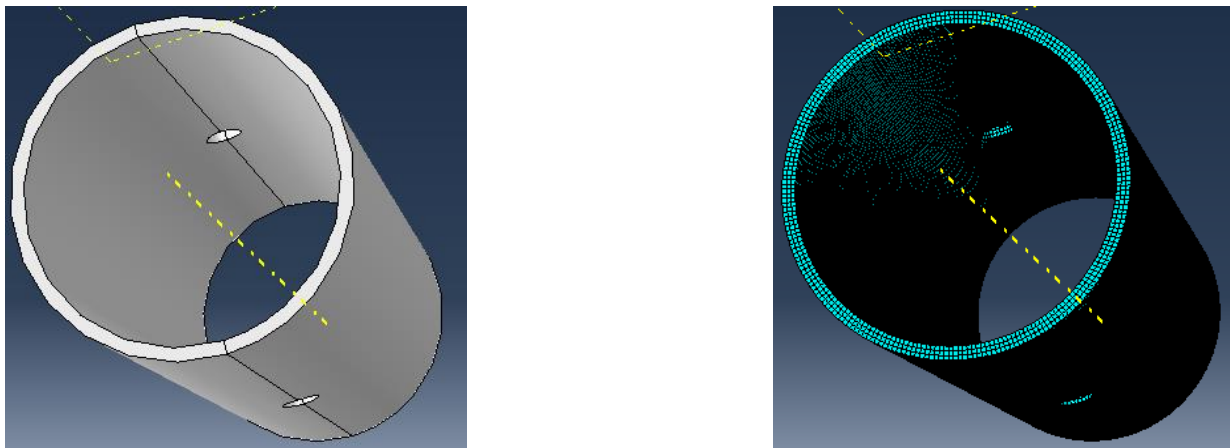


Figure III.15 : vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 trous.

#### Résultats des éprouvettes à deux trous

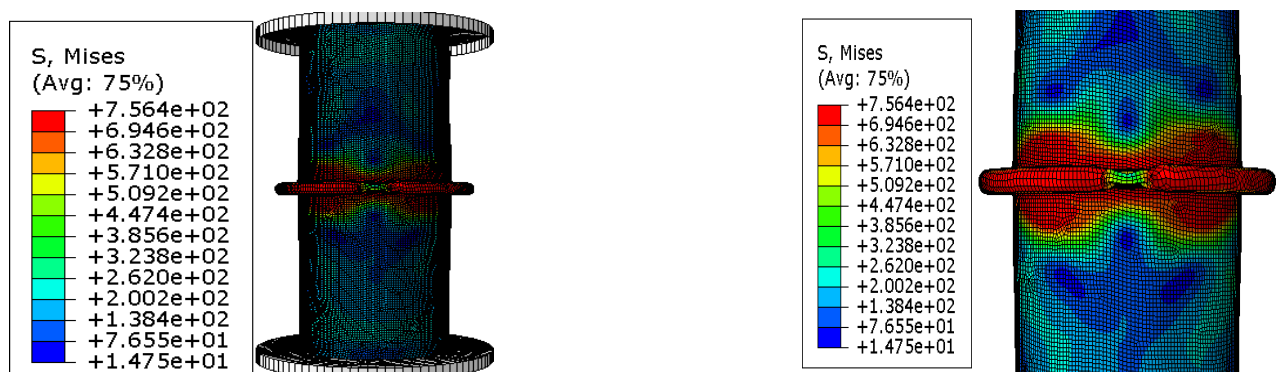


Figure III.16 : Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette a la fin de chargement.

### III.4.1.2 Les éprouvettes à quatre trous (2 faces / 2lignes)

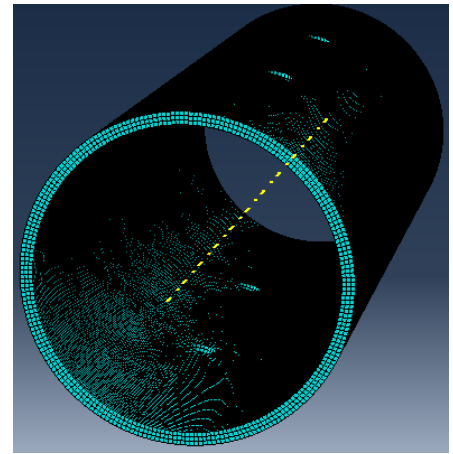
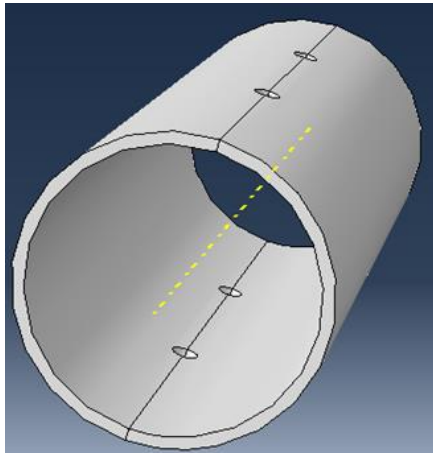
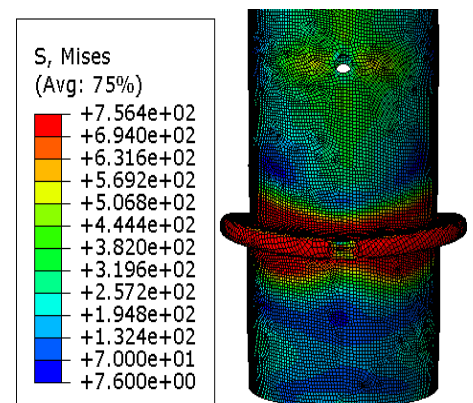
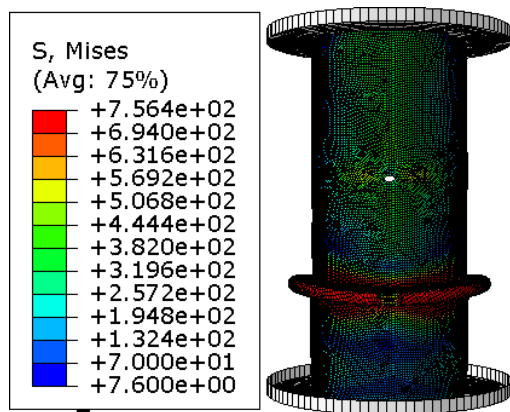


**Figure III.17 :** vue schématique l'expérience des éprouvettes à 04 trous.

### Les résultats des éprouvettes à quatre trous



**FigureIII.18 :** Distribution des contraintes de von mises des échantillons 4 trous.

### III.4.1.3 Les éprouvettes à quatre trous (4 faces/ 1ligne)

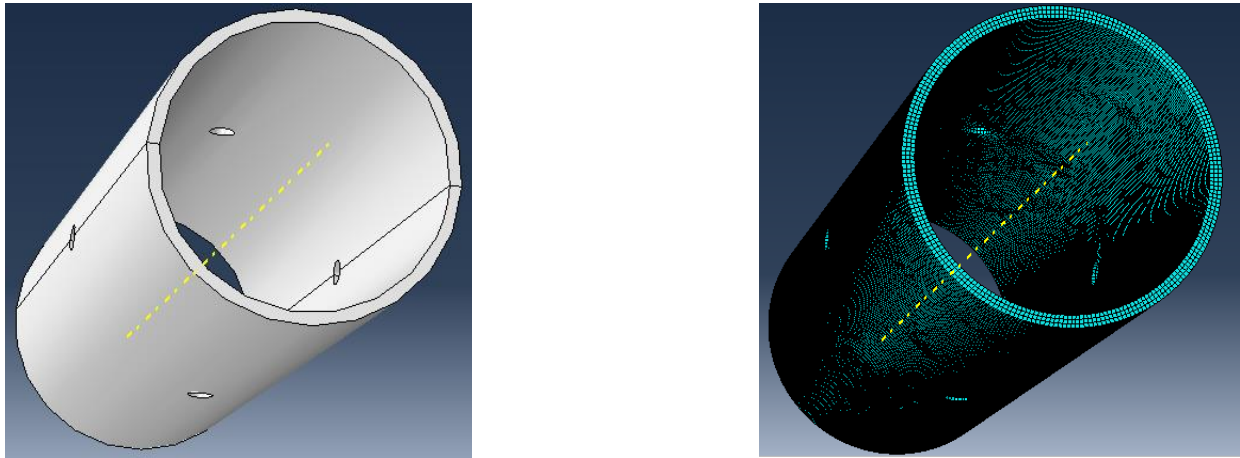


**Figure III.19 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 trous.

#### Les résultats de ces éprouvettes

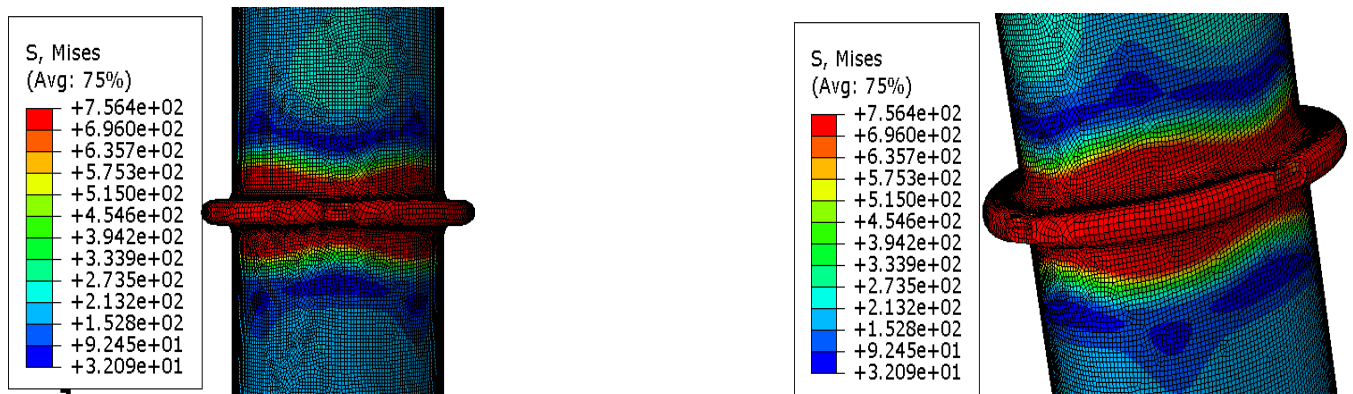


**Figure III.20 :** Distribution des contraintes de von mises des échantillons à quatre trous (4 faces/ 1ligne).

#### III.4.1.4 Les éprouvettes à huit trous (4faces /2lignes)

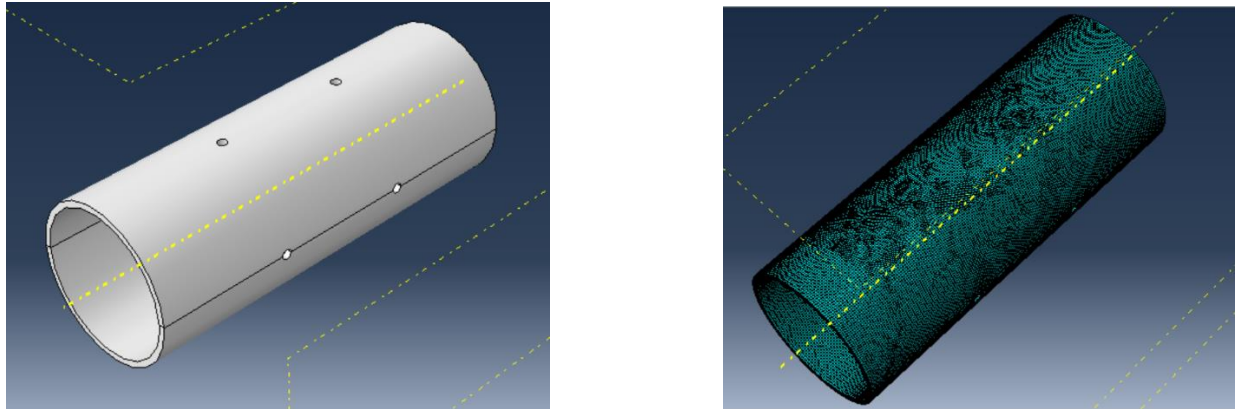


**Figure III.21 :** Géométrie et maillage du tube perforé avec 8 trous.

#### Les résultats des éprouvettes

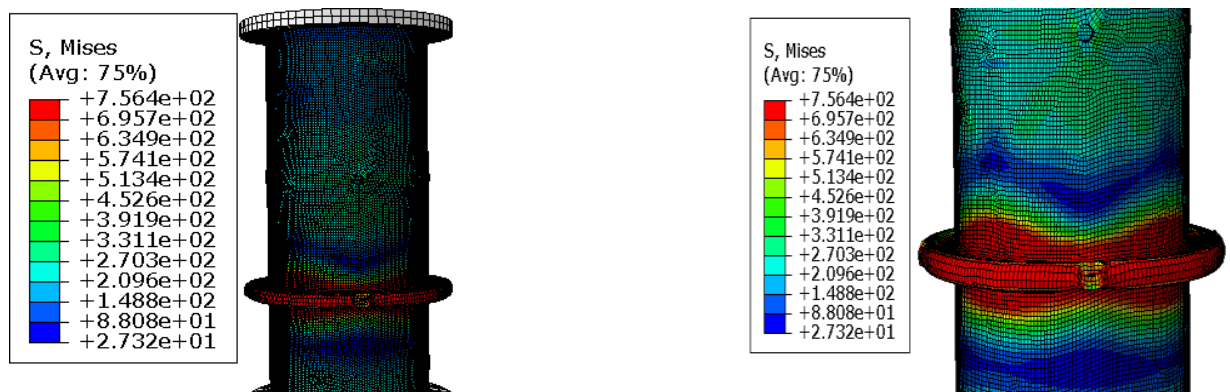


**Figure III.22:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 8 trous (2trous 4 faces) après le chargement axial.

Dans cette partie, les résultats de simulations numérique des tubes avec des trous circulaires sont présentés sur **les figures III.16 ; III.18 ; III.20 ; III.22** les contours de contrainte de Von Mises et la forme de déformation des éprouvettes. On remarque que le mode de déformation du tube perforé à deux trous (2faces/1 ligne) et celui à quatre trous (4 faces/1 ligne) et le tube troué à huit trous (4 faces/2 lignes) soumis à une charge axiale a commencé à partir de mi-hauteur là où se trouvent les trous, ce mode était semblable et symétrique en formant un seul lobe. Par contre le tube perforé à 4 trous (2faces/2 lignes) le lobe est formé dans la deuxième ligne, la première ligne est restée sans formation de lobe.

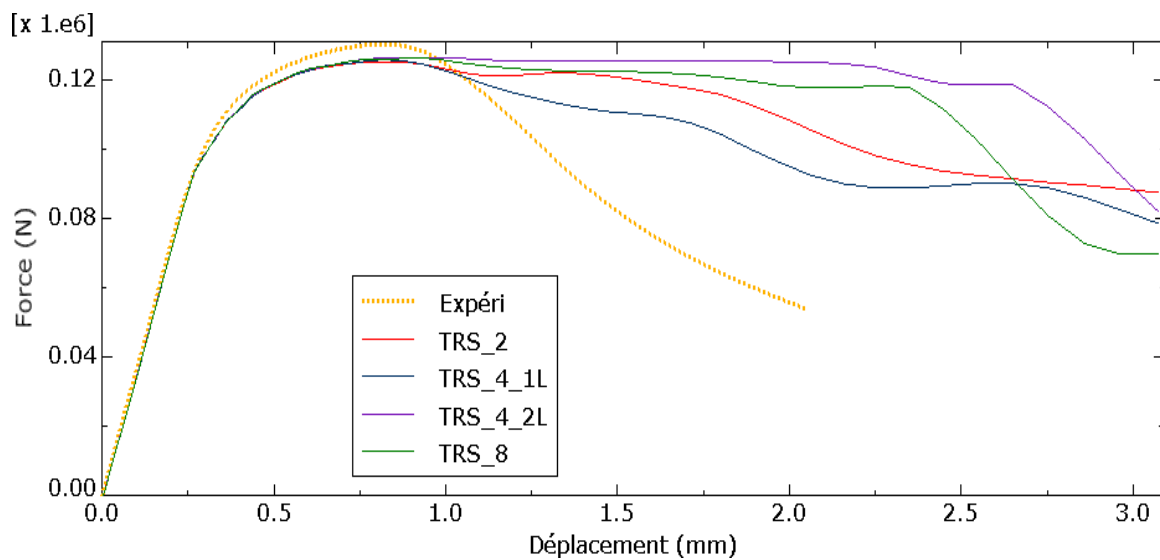


**Figure III.23:** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme de cercle.

La figure III.23 compare les courbes force-déplacement des tubes perforés (2,4 et 8trous) avec la courbe expérimentale, nous pouvons conclure que le tube perforé à 4 trous (1face-2lignes) a été soumis à la plus grande force ; ce qui veut dire que c'est lui qui a absorbé mieux l'énergie.

### III.4.2 Les ellipses

Dans cette section, on s'intéressera aux perforations sous forme d'ellipse. Cette forme autre paramètre qui est l'inclinaison (verticale, horizontale). Nous avons suivi la même démarche méthodologie que pour les trous circulaires afin de comparer les résultats et parvenir à une conclusion.

#### III.4.2.1 Les ellipses verticales

##### III.4.2.1.1 Deux ellipses (2 faces / 1 ligne)

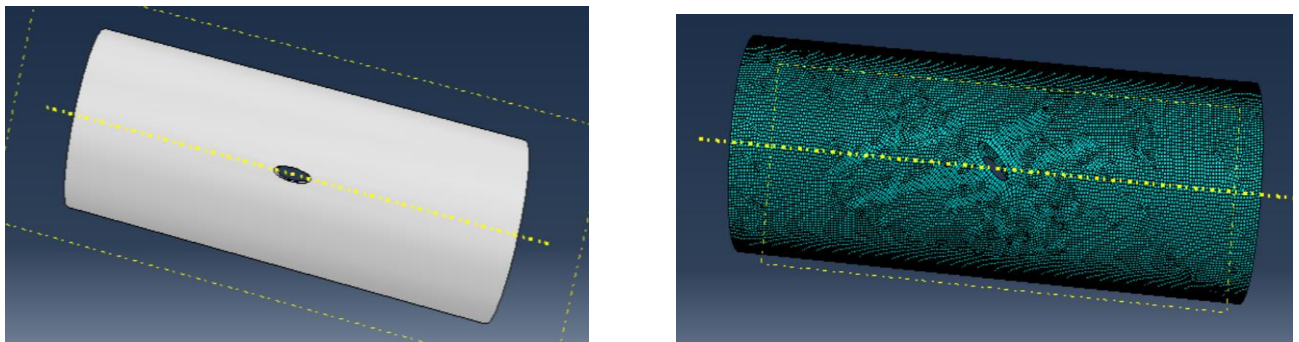


**Figure III.24 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses.

#### Les résultats des éprouvettes

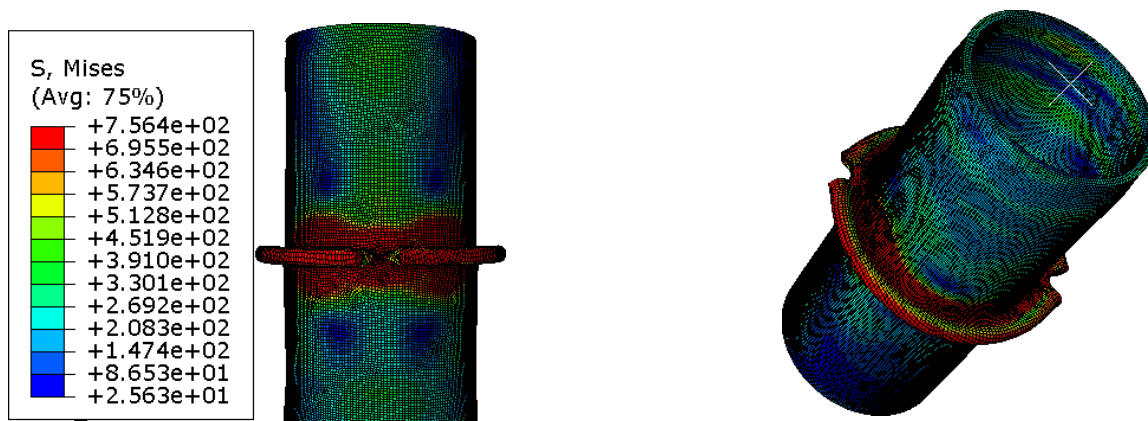


**Figure III.25 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses après le chargement axial.

## III.4.2.1.2 Quatre ellipses (2faces /2 lignes)

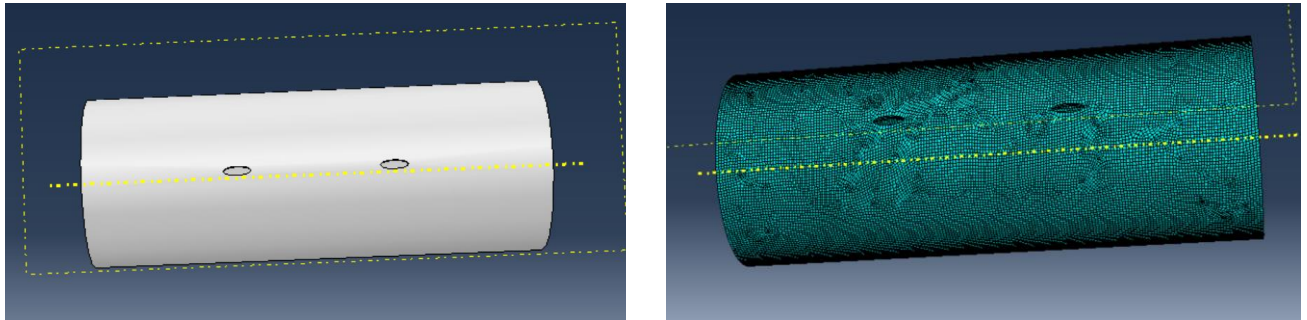


**Figure III.26:** Géométrie et maillage de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses.

## Les résultats des éprouvettes

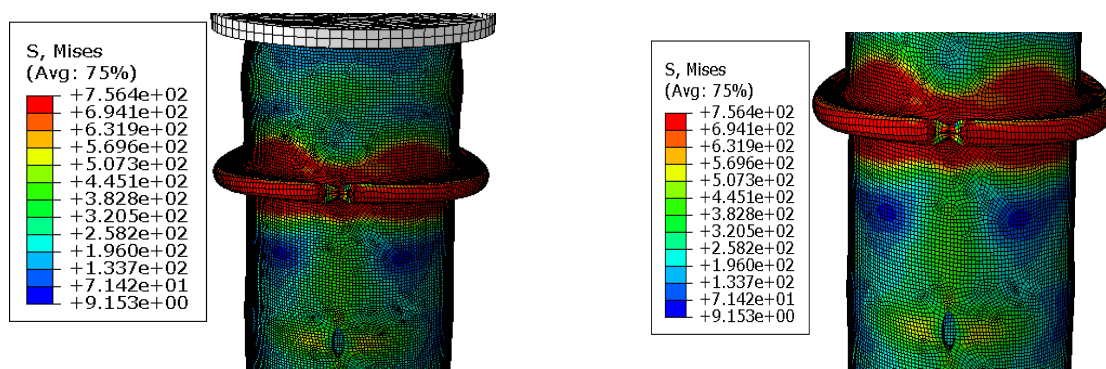


**Figure III.27:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses après le chargement axial.

## III.4.2.1.3 Quatre ellipses (4 faces /1ligne)

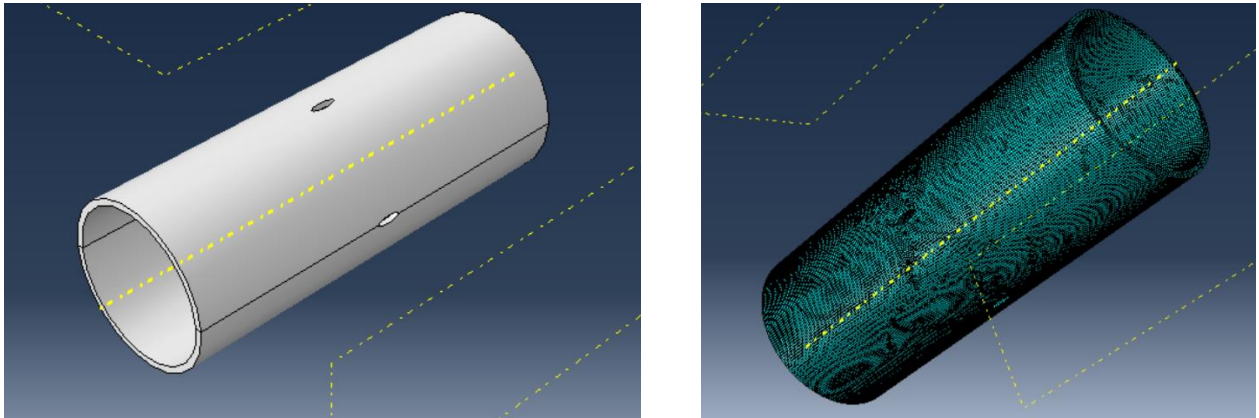


**Figure III.28:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses (1 ellipse 4 faces).

## Les résultats des éprouvettes

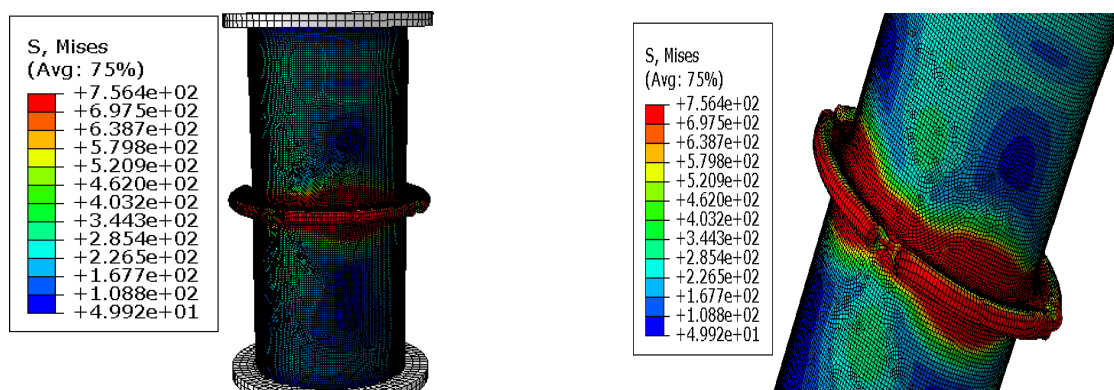


**Figure III.29:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses (1ellipse 4 faces) après le chargement axial.

## III.4.2.1.4 huit ellipses (4 faces/ 2 lignes)

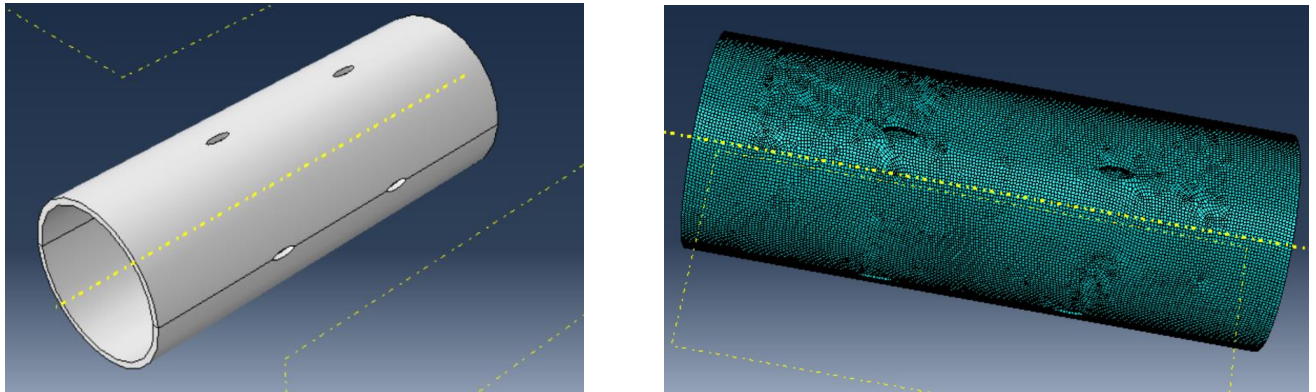


Figure III.30: vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8 ellipses.

## Les résultats de l'éprouvette



Figure III.31: Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette8 ellipses après le chargement axial.

Les résultats des simulations numériques pour les tubes perforés en forme d'ellipses soumis à un chargement axial et les contours des contraintes de Von mises ainsi que les éprouvettes déformées sont représentés sur les figure III.25 ; III.27 ; III.29 et III.31.

Nous observons que le tube perforé avec deux ellipses (2faces/1 ligne) présente une déformation au milieu, formant un seul lobe. De même le tube perforé avec quatre ellipse (4 faces/1ligne) montre une déformation au niveau de la première ligne d'ellipses, tandis que la deuxième ligne demeurant non déformée. Enfin, le tube perforé avec huit ellipses montre une déformation similaire au tube de référence, se fléchissant au début du tube.

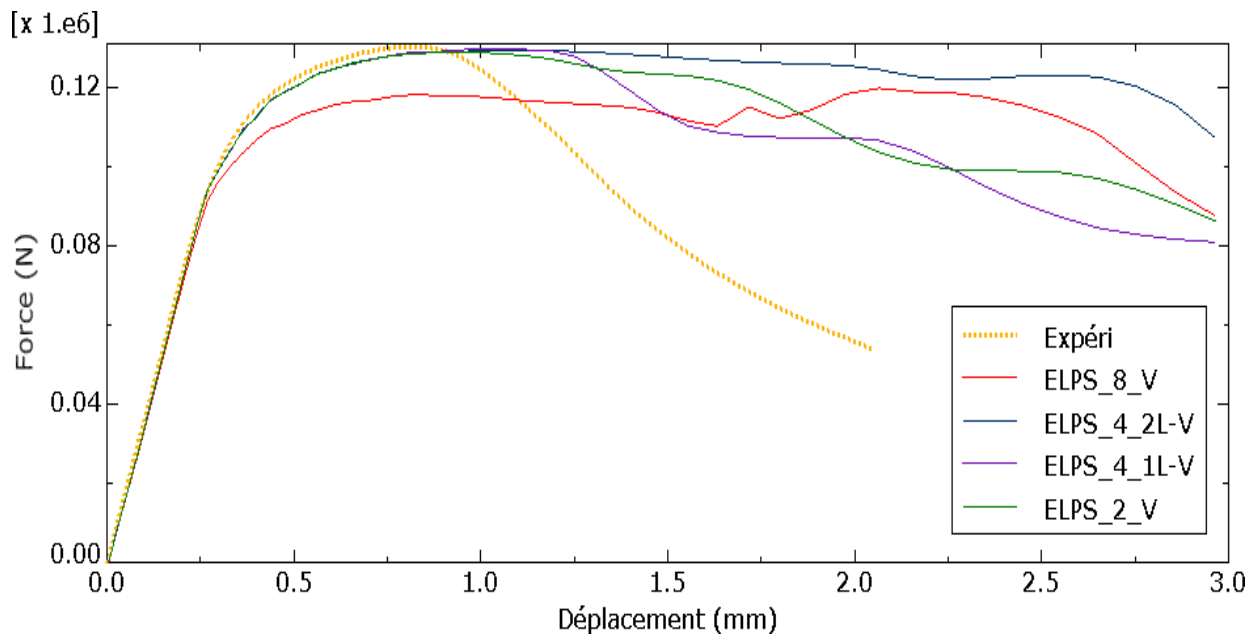


**Figure III.32 :** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses verticales.

Après avoir analysé les courbes force-déplacement des tubes perforés en forme d'ellipses verticales (voir la figure III.32), nous avons comparé ces courbes à la courbe expérimentale. Nous avons constaté que le tube perforé comportant 4 ellipses (2 sur chaque face) présente la force maximale, ce qui indique qu'il a absorbé une quantité d'énergie supérieure aux autres configurations, nous avons choisi cette courbe comme étant la plus efficace en termes d'absorption d'énergie.

## III.4.2.2 Les ellipses horizontalement

## III.4.2.2.1 Deux ellipses (2 faces / 1 ligne)

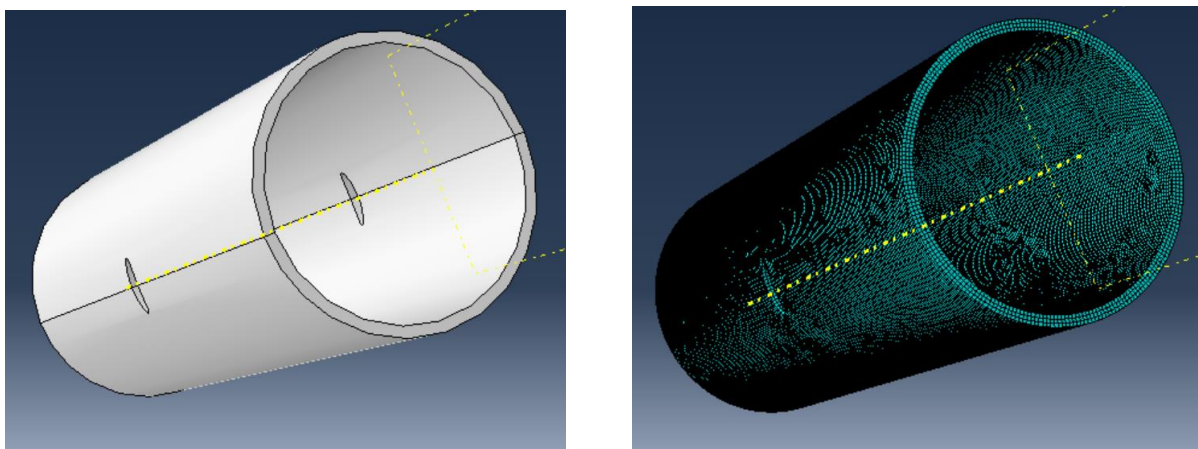


**Figure III.33 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses horizontales.

## Les résultats de l'éprouvette

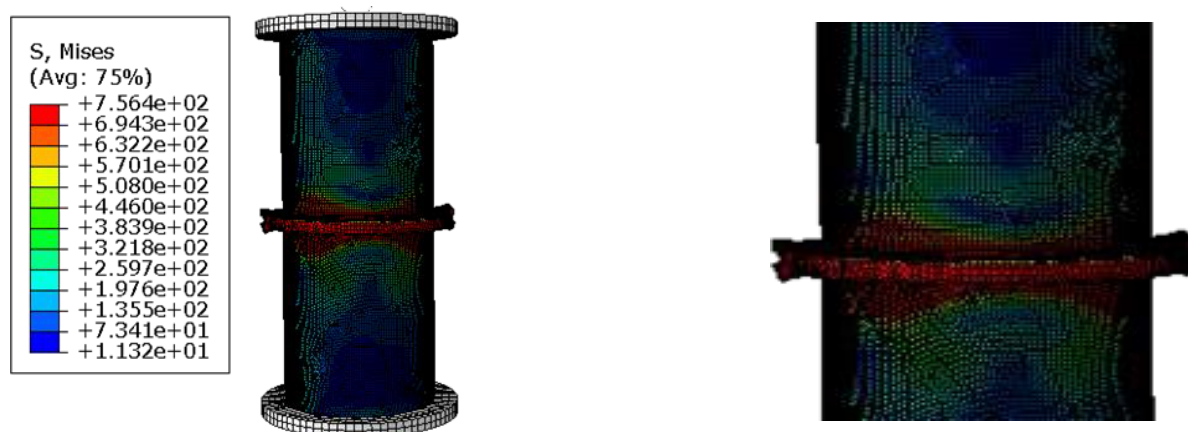


**Figure III.34 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses horizontale après le chargement axial.

## III.4.2.2.2 Quatre ellipses (2 faces /2ligne)

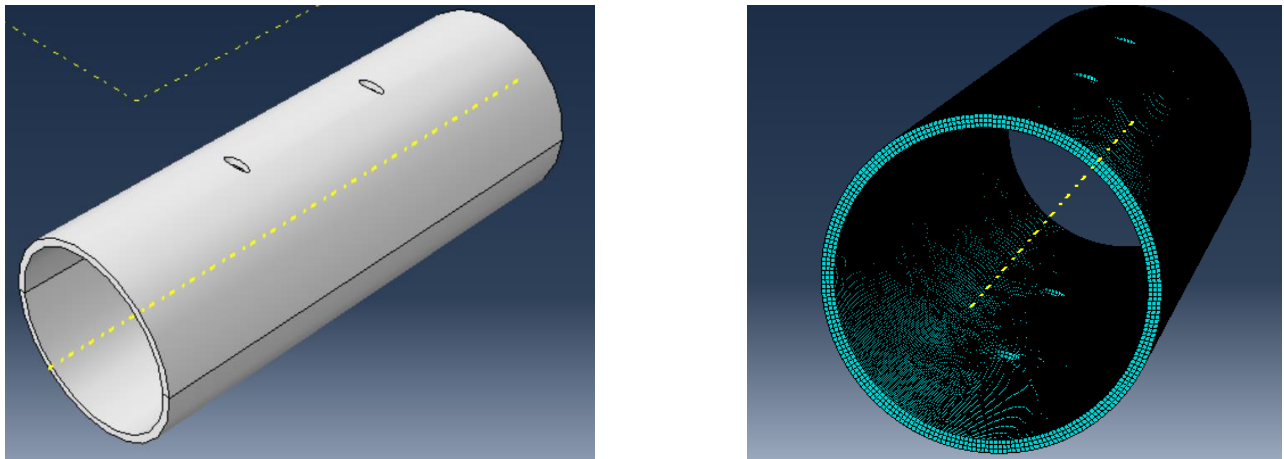


**Figure III.35 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses horizontales (2 faces/2lignes).

## Les résultats de l'éprouvette

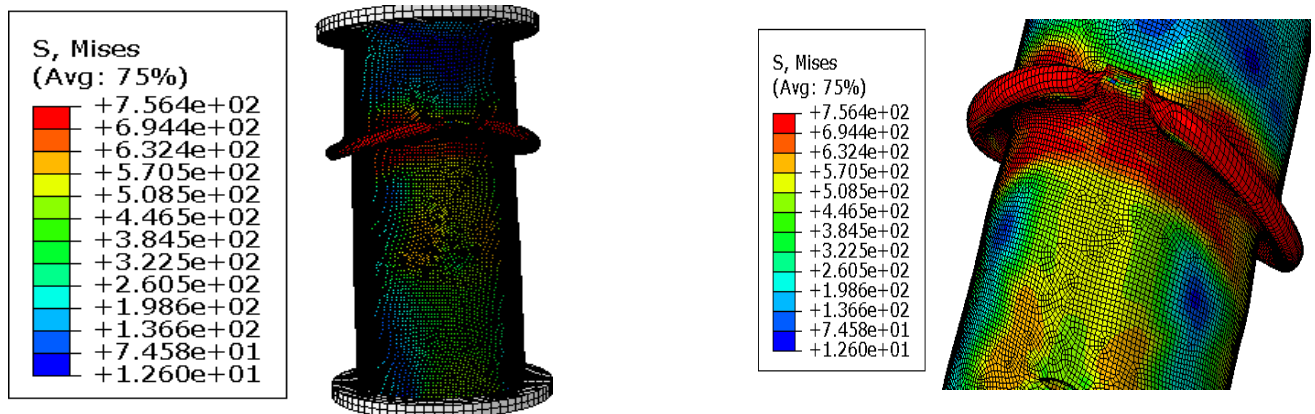


**Figure III.36 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses horizontales (2faces/2lignes) après le chargement axial.

## III.4.2.2.3 Quatre ellipses (4 faces/1 ligne)

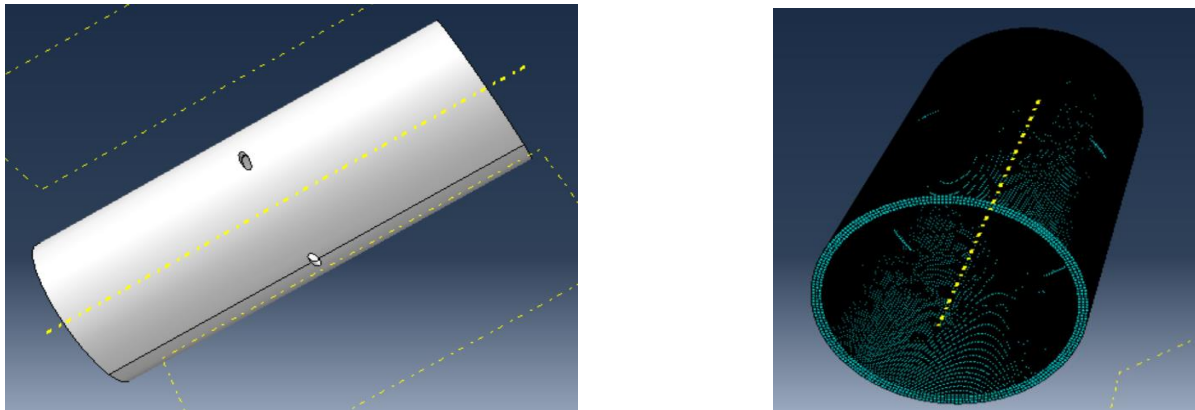


**Figure III.37 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 04 ellipses horizontales (4faces/1lignes) après le chargement axial.

Les résultats de l'éprouvette

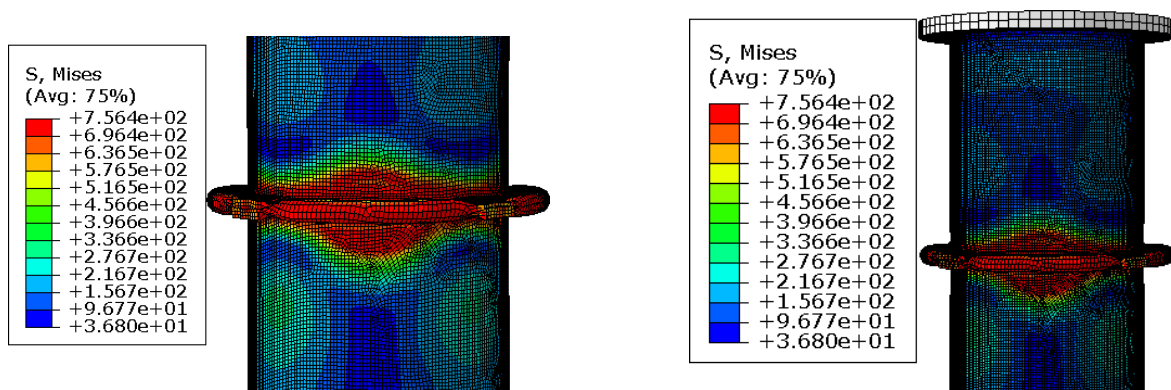


**Figure III.38:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 04 ellipses horizontales (4faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.2.2.4 Huit ellipses (4 faces/ 2 lignes)

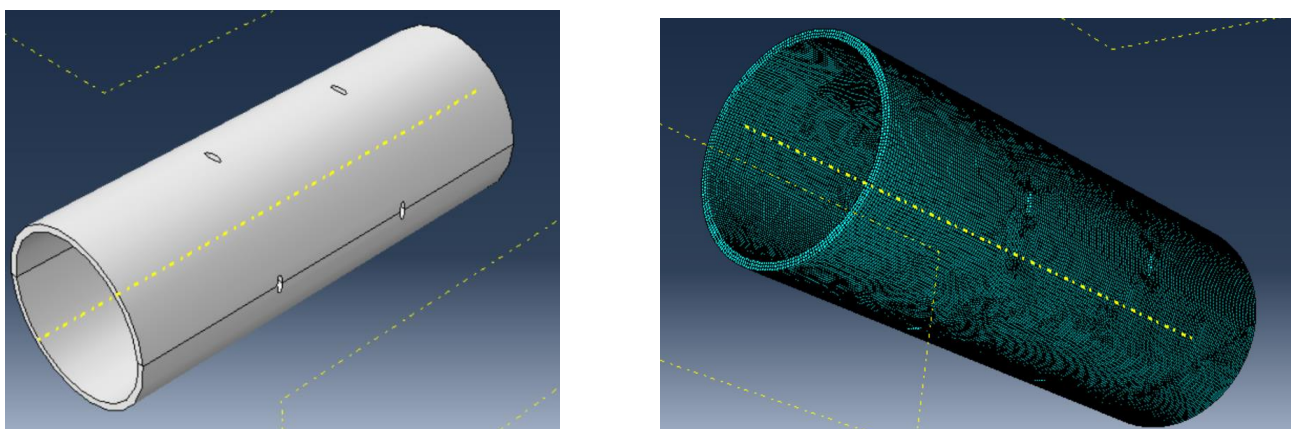


**Figure II.39 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8ellipses horizontales (4 faces/2lignes).

## Les résultats de l'éprouvette

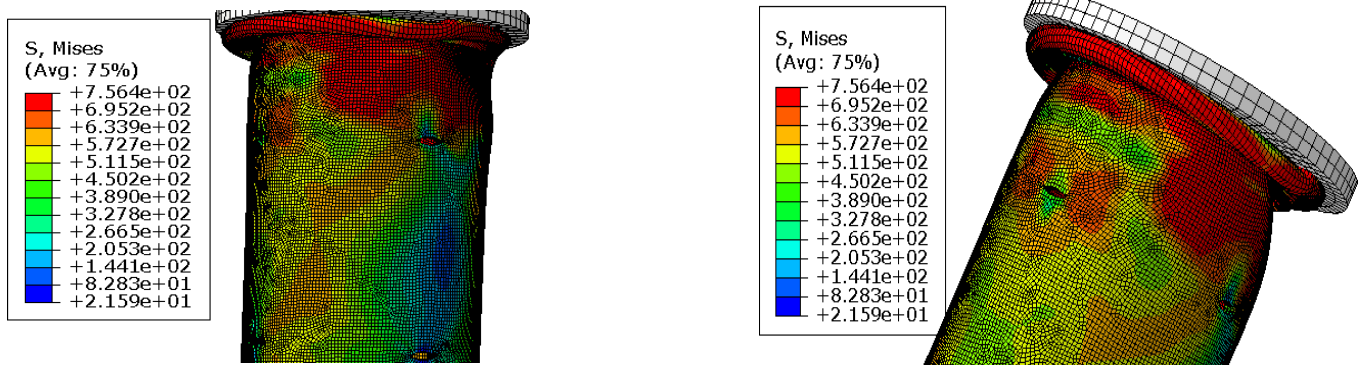


**Figure III.40 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses horizontales (4faces/2lignes) après le chargement axial.

Après l'analyse des résultats dans les figures précédentes, nous avons observé que le tube perforé avec 2 ellipses et 4 ellipses (4faces/1ligne) présente un flambage au centre. En revanche, le tube perforé avec 4 ellipses (2faces/2lignes) montre un flambage incliné sur la première ligne d'ellipse, tandis que la deuxième ligne reste intacte. Comparativement, le tube perforé avec 8 ellipses se déforme au début pour former un seul lobe similaire au tube de référence, sans affecter les ellipses. Nous avons également observé qu'il présente une légère inclinaison après la formation du lobe.

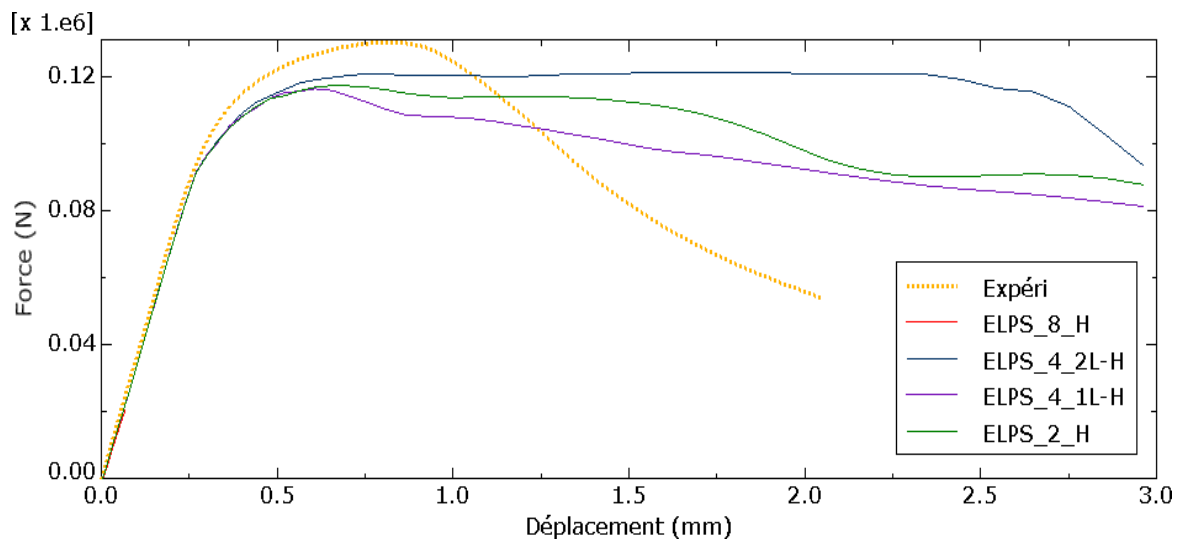


**Figure III.41 :** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses horizontales.

Après avoir obtenu les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses horizontales dans la figure III41, nous les avons comparés avec la courbe expérimentale. Nous observons que la force maximale est décrite par le tube perforé de 4 ellipses (1face-2lignes), ce qui veut dire que c'est lui qui a absorbé mieux d'énergie.

### III .4.2.3 Les ellipses inclinées

Dans cette partie, nous avons créé des ellipses inclinées à un angle de  $45^\circ$  ayant les mêmes dimensions que les ellipses précédentes.

#### III .4.2.3.1 Deux ellipses (2 faces/1 ligne)

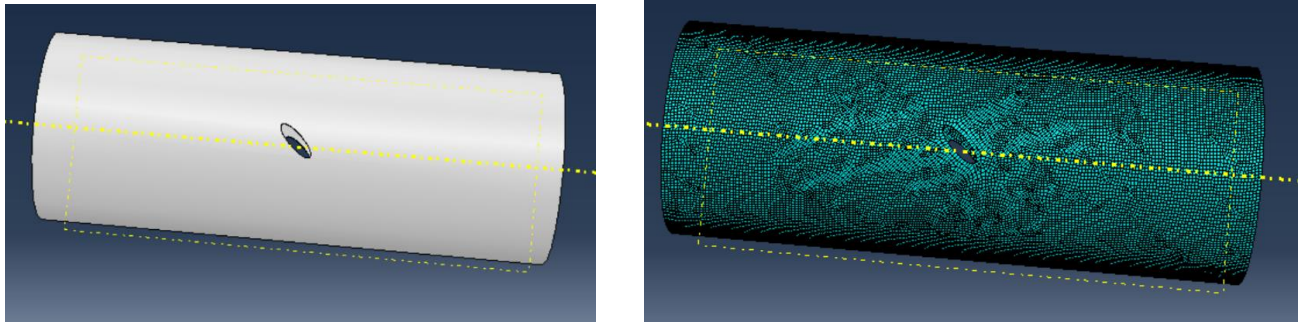


**Figure III.42 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 2 ellipses inclinées (2 faces/1 ligne).

#### Les résultats de l'éprouvette

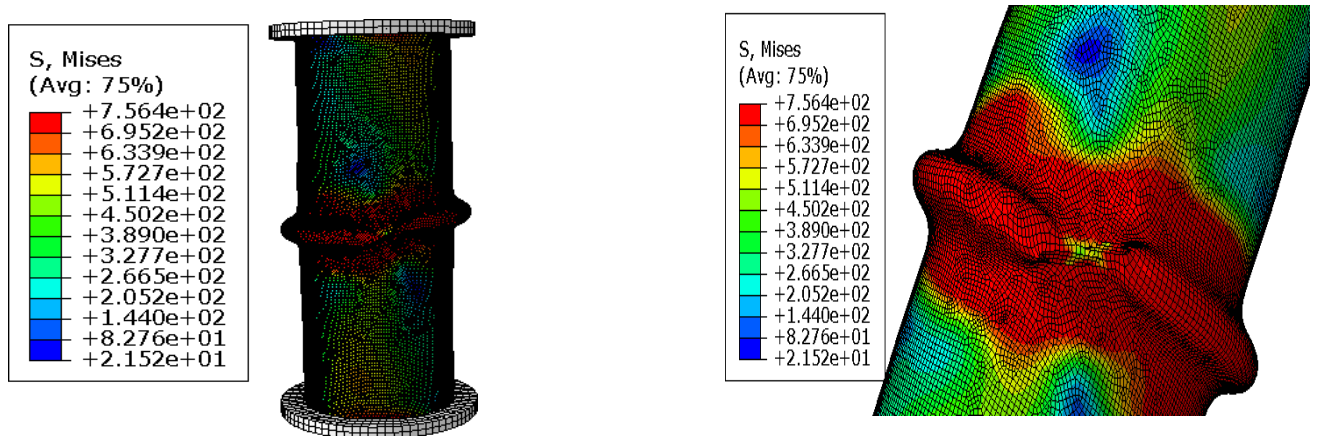


**Figure III.43 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 2 ellipses inclinées (2faces/1ligne) après le chargement axial.

## III .4.2.3.2 Quatre ellipses (2 faces/2 ligne)

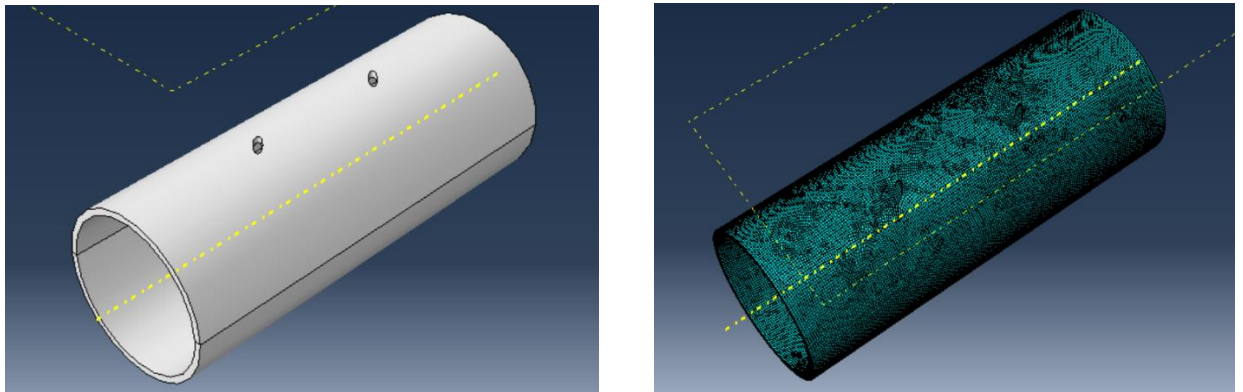


**Figure III.44 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses inclinées (2 faces/2ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

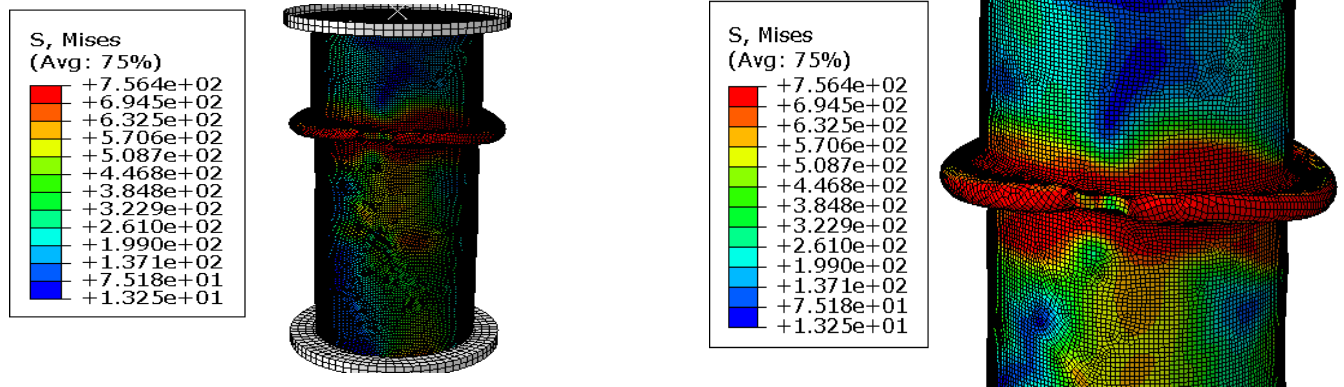


**Figure III.45 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (2faces/2ligne) après le chargement axial.

## III .4.2.3.3 Quatre ellipses (4 faces/1 ligne)

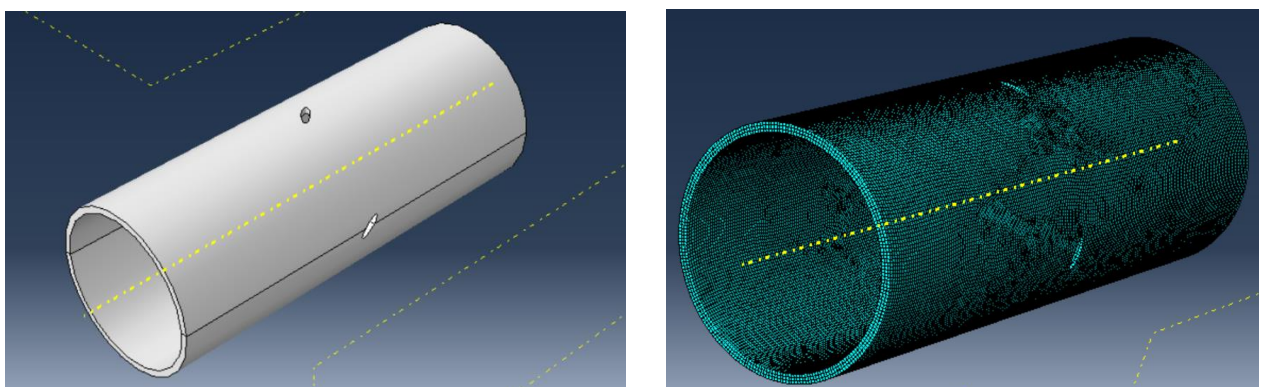


**Figure III.46:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 4 ellipses inclinées (4faces/ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

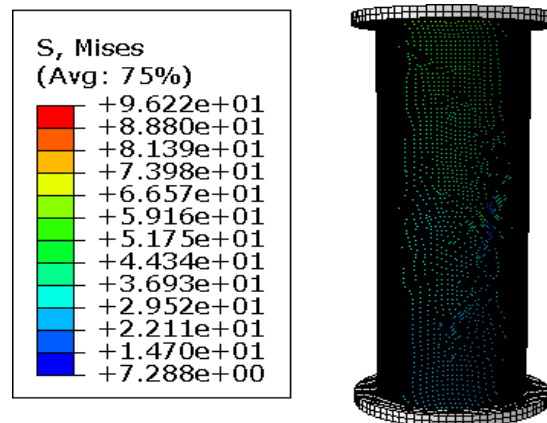


**Figure III.47 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (4faces/1 ligne) après le chargement axial.

## III .4.2.3.4 Huit ellipses (4faces/2 lignes)

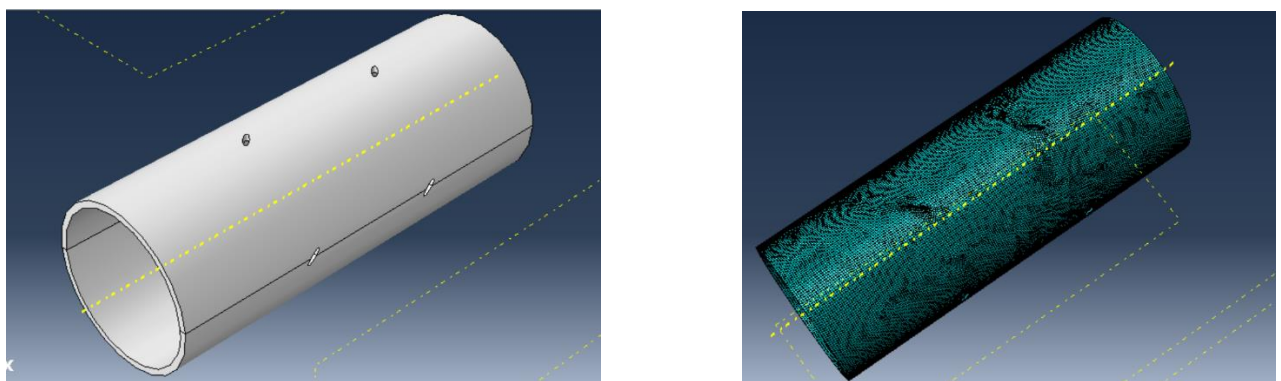


**Figure III.48:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes à 8 ellipses inclinées (4faces/2 ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

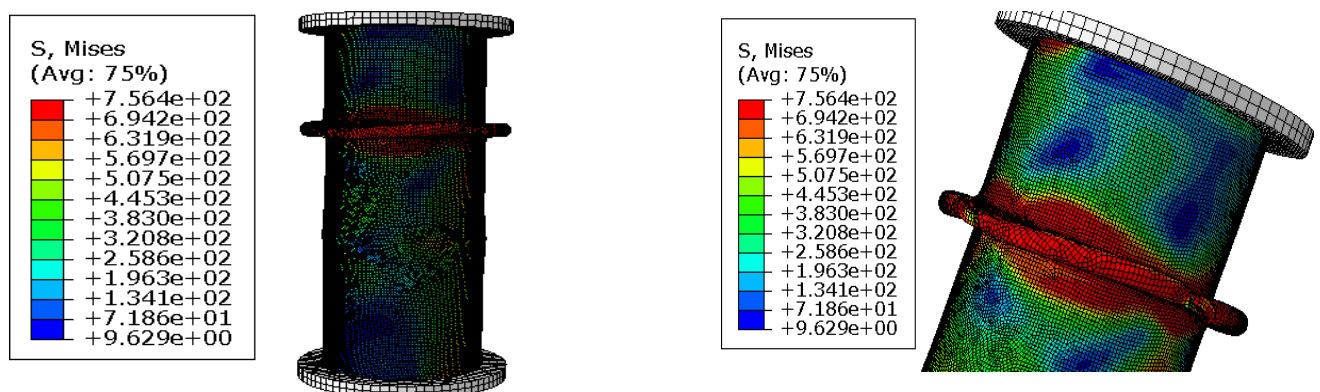


**Figure III.49 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette 4 ellipses inclinées (4faces/2 lignes) après le chargement axial.

Nous remarquons que le tube perforé à 2 ellipses (2faces/1ligne) est déformé en formant un seul lobe incliné au milieu du tube même chose pour le tube perforé à 04 ellipses (4 faces/1 ligne) ; un lobe est formé sur la première ligne de celui de 08 ellipses (4 faces/2ellipses) par contre le tube perforé à 04 ellipses inclinées (2 faces/2 lignes) s'est resté sans déformations ce qui veut dire que c'est le meilleur tube qui absorbe mieux d'énergie.

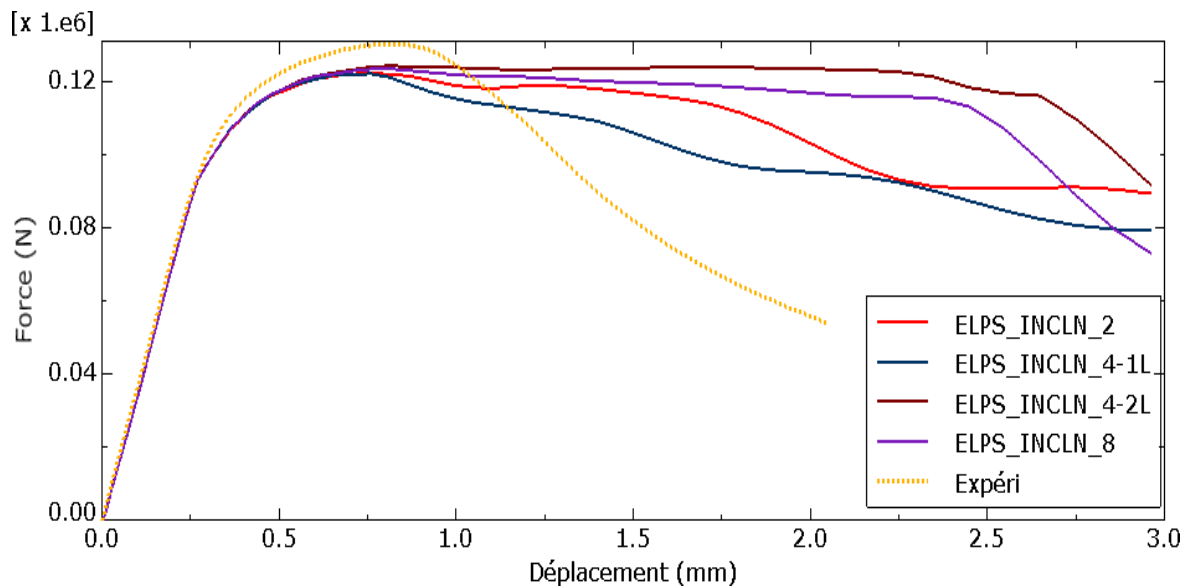


**Figure III.50 :** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des ellipses inclinées.

La figures III.50 montre la comparaison entre les courbes forces-déplacement numérique et celle de l'expérimentale, nous avons remarqué que la force maximale est décrite par le tube perforé avec 4 ellipses (2 faces-2 lignes), ce qui veut dire que c'est lui qui a absorbé mieux d'énergie. Donc nous avons choisi sa courbe illustrée dans la figure précédente.

### III.4.3 Les rainures

#### III.4.3.1 Les rainures verticales

Cette fois-ci, nous avons opté pour l'ajout de petites rainures de forme triangulaire, positionnées de manière à correspondre aux emplacements des trous et des ellipses, dans le but d'analyser et de comparer les résultats obtenus.

##### III.4.3.1.1 Deux rainures à (2 faces /1 ligne)

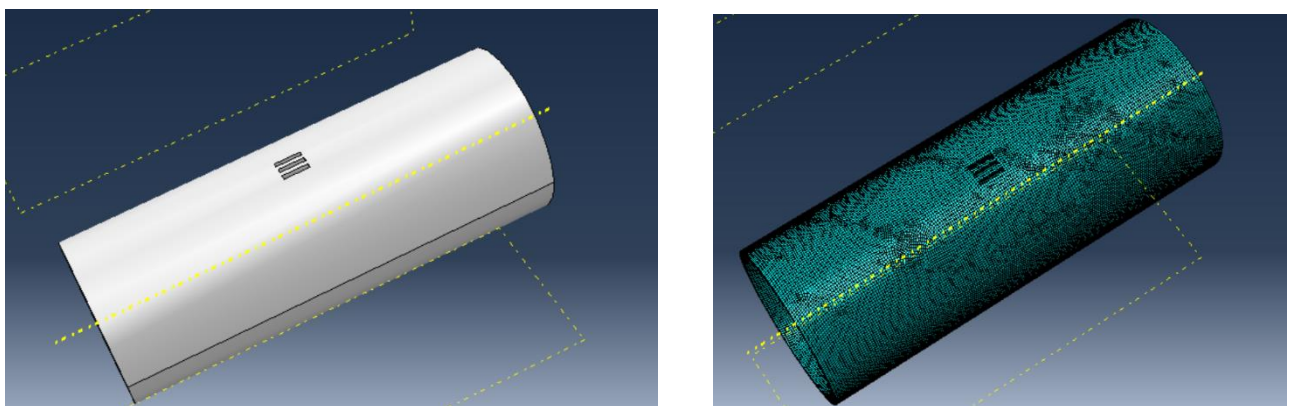


**Figure III.51:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (2 faces/1 ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

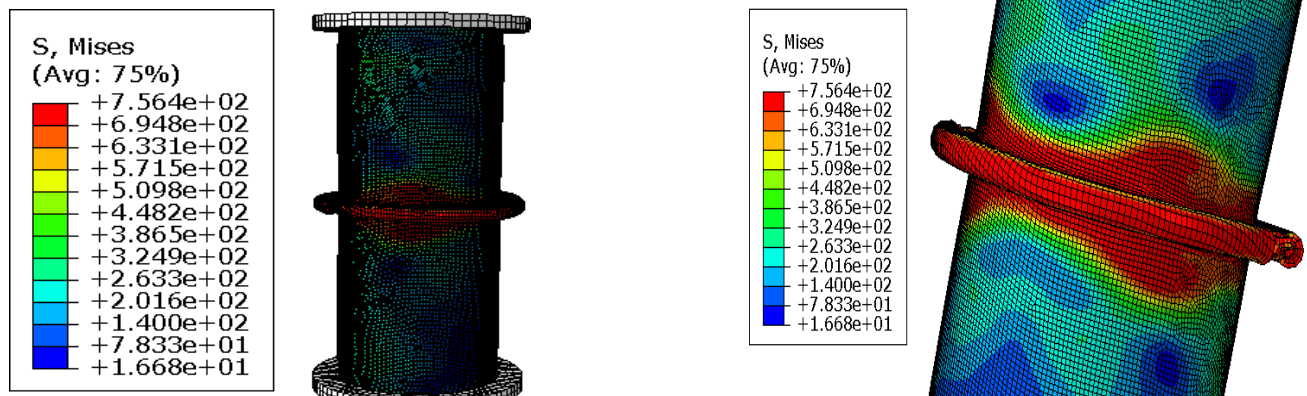


**Figure III.52 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (2faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.3.1.2 Quatre rainures à (4faces/1ligne)

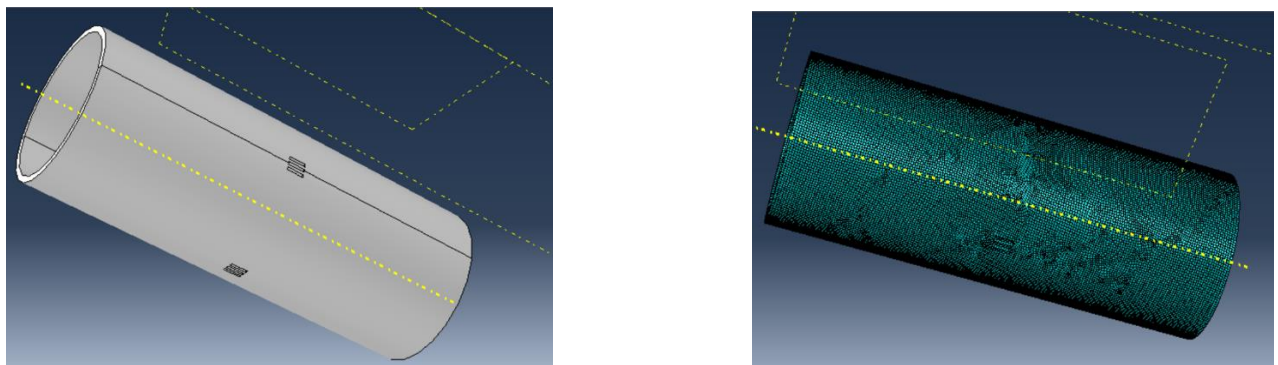


**Figure III.53:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (4faces/1ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

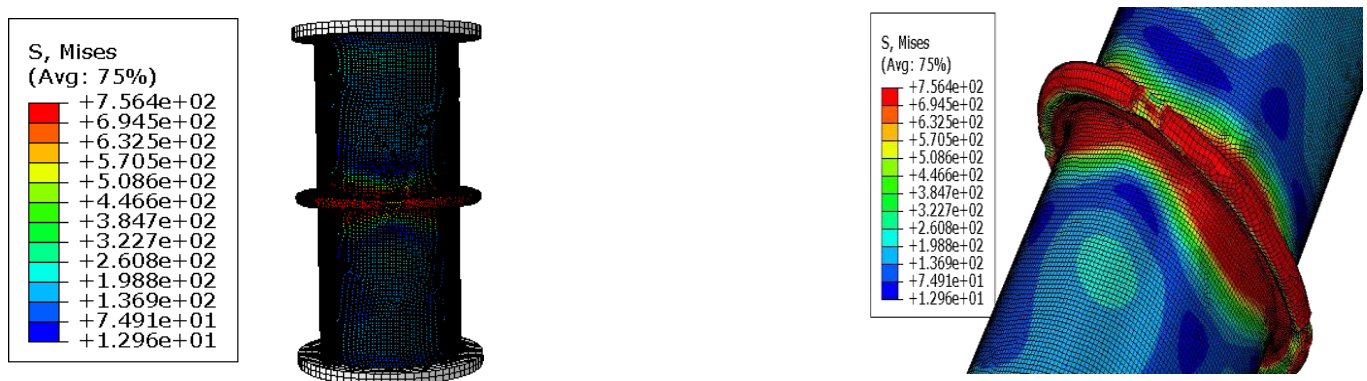


**Figure III.54 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (4faces/1ligne) après le chargement axial.

### III.4.3.1.3 Quatre rainures à (2faces/2lignes)

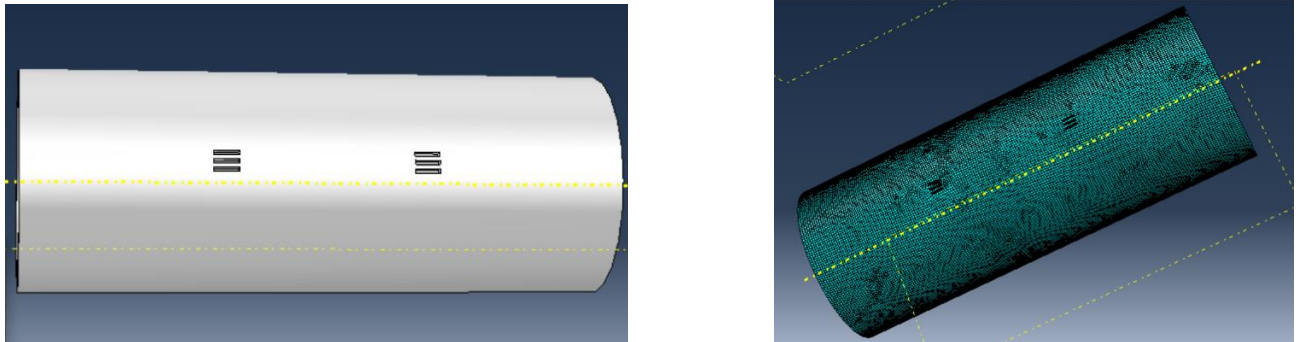


**Figure 55 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (2faces/2ligne).

### Les résultats de l'éprouvette

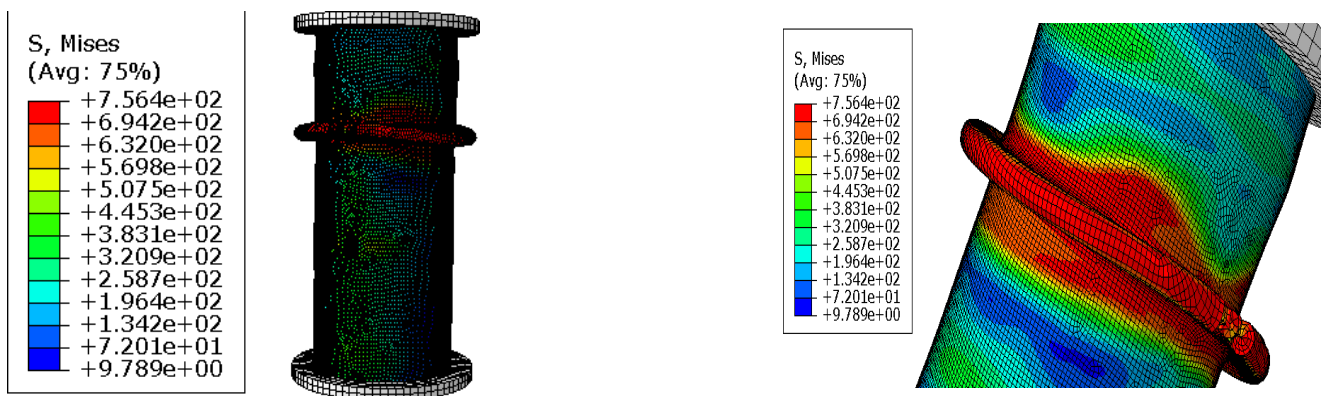


**Figure III.56 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (2faces/2ligne) après le chargement axial.

### III.4.3.1.4 Huit rainures à (4faces/2lignes)

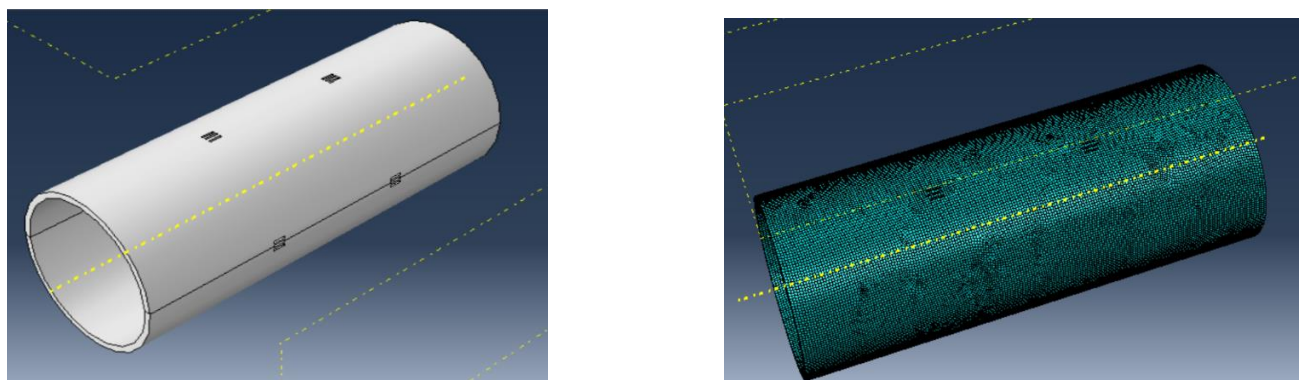


**Figure III.57:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures à (4faces/2ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

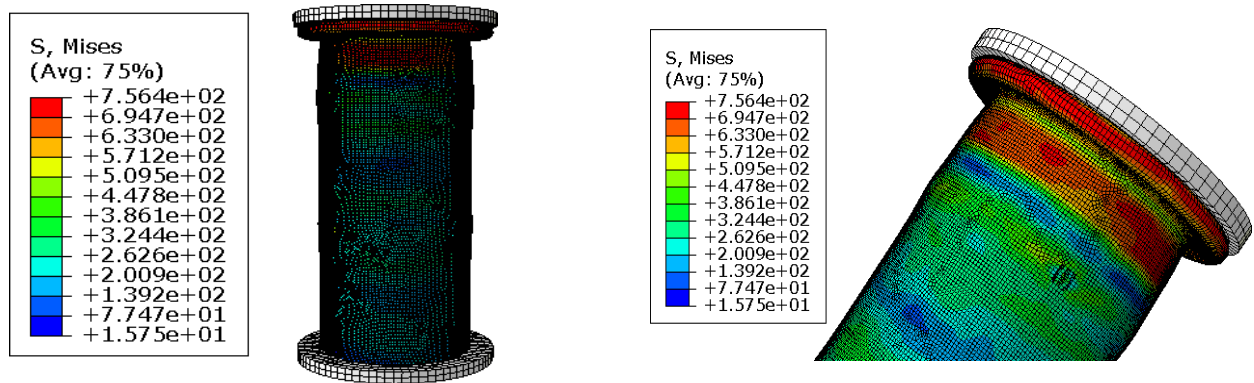


**Figure III.58 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à (4faces/2lignes) après le chargement axial.

Après l'examen des résultats des figures précédentes, nous avons noté que l'ajout de rainures sur deux faces avec une seule ligne et sur quatre faces produit le même effet : la création d'un tube au centre du tube. Cependant, lorsque les rainures sont appliquées sur deux lignes, le tube subit une déformation principalement sur la première ligne, tandis que la deuxième ligne reste stable. Lorsque les rainures sont réalisées sur quatre faces avec deux lignes, un lobe se forme au début du tube ; suivant un mode de déformation similaire au tube de référence.

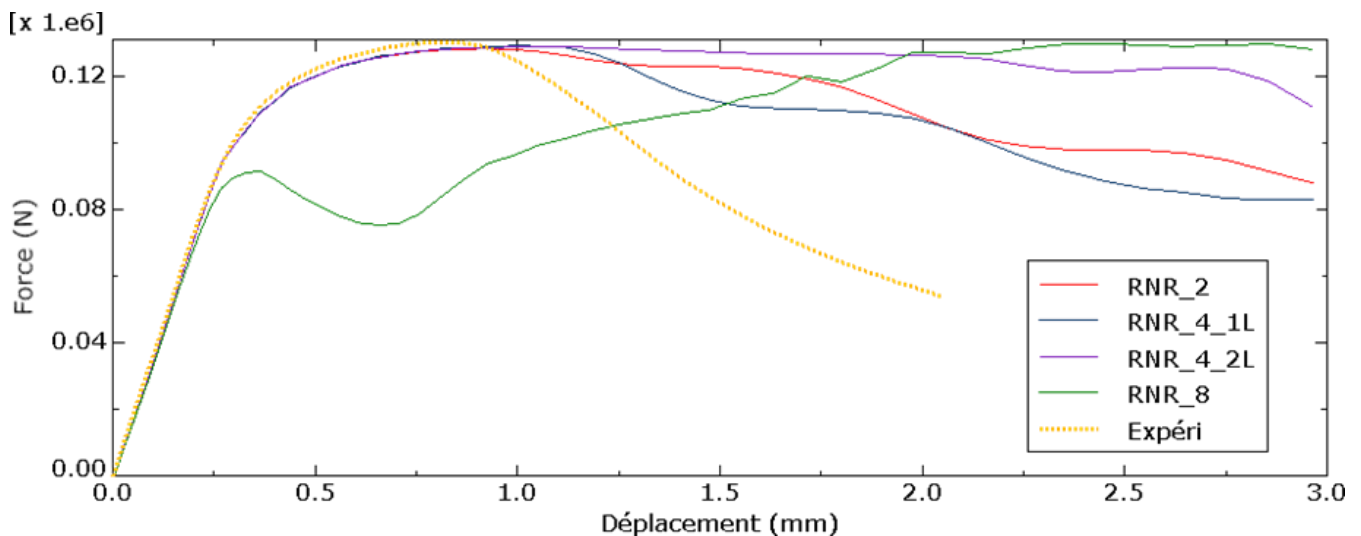


**Figure III.59 :** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des rainures.

La figure III.59 montre une comparaison des courbes force-déplacement expérimentale et numérique avec l'évaluation de l'énergie expérimentale et numérique. Après avoir comparé les courbes de force- déplacement pour les tubes perforés avec différentes configurations de rainures avec la courbe expérimentale, nous avons observé que la force maximale est atteinte par le tube comportant quatre rainures (une face/deux lignes). Cela indique qu'il a absorbé plus d'énergie.

### III.4.3.2 Rainures horizontales

#### III.4.3.2.1 Deux Rainures à (2faces/1ligne)

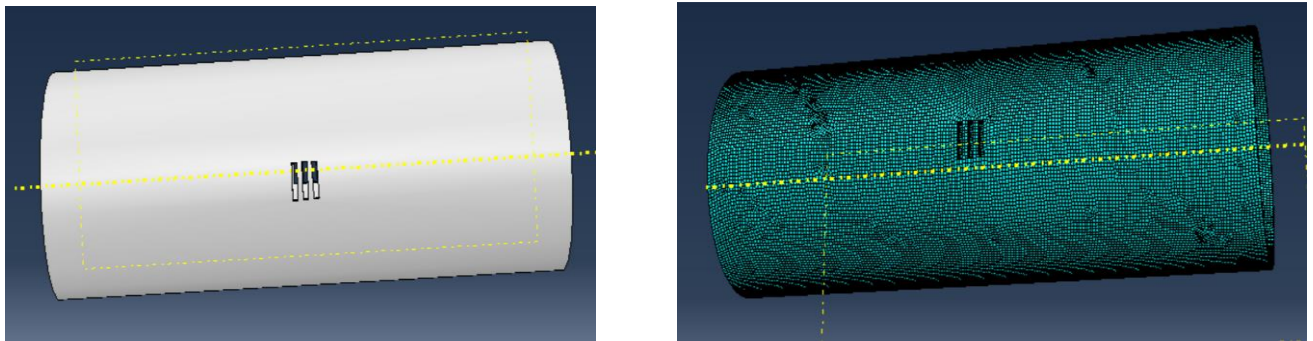


**Figure III.60:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (2faces/1ligne).

### Les résultats de l'éprouvette

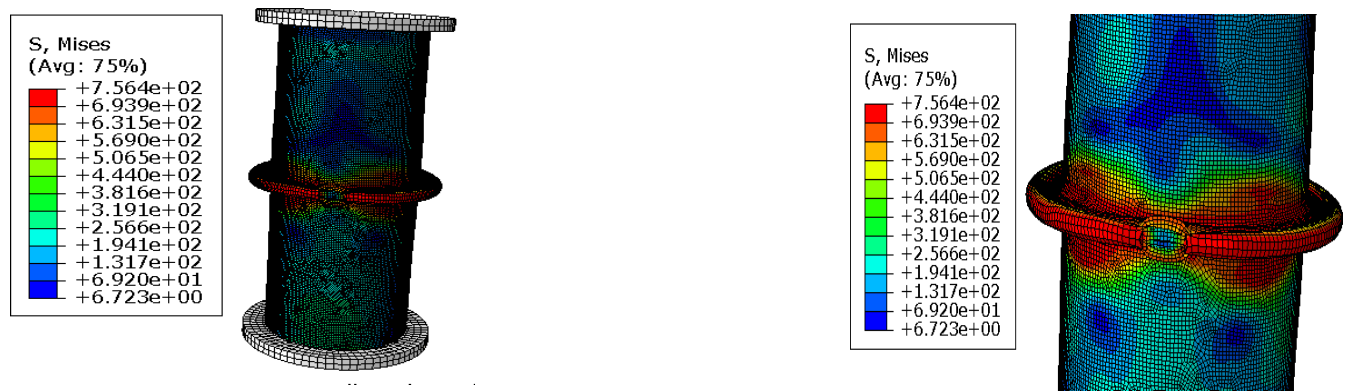


**Figure III.61 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures horizontales à (2faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.3.2.2 Quatre rainures à (2faces/2lignes)

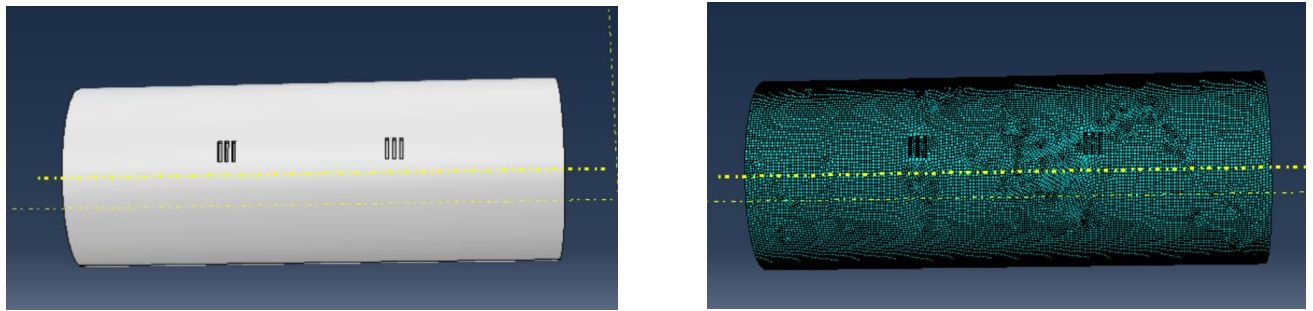


**Figure III.62:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (2faces/2ligne).

## Les résultats de l'éprouvette



## III.4.3.2.3 Quatre rainures à (4faces/1ligne)

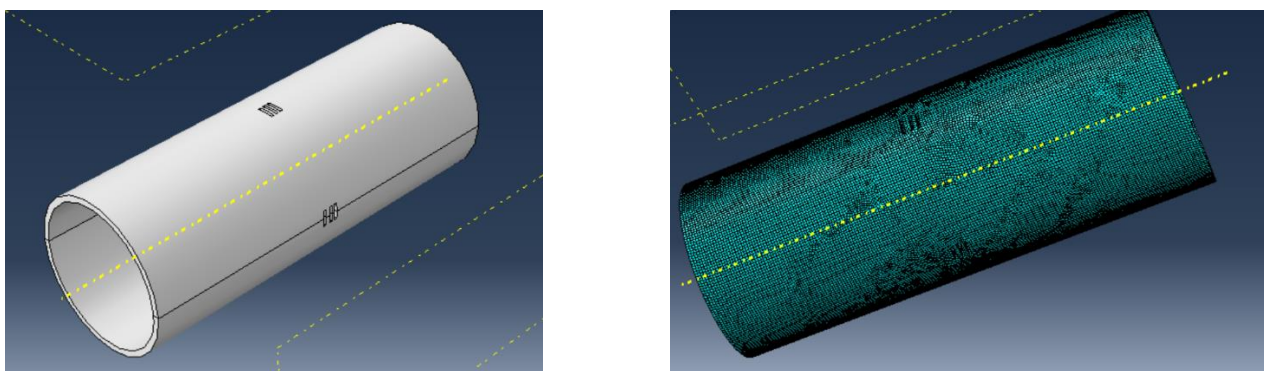


**Figure III.64:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures horizontales à (4faces/1ligne).

## Les résultats de l'éprouvette

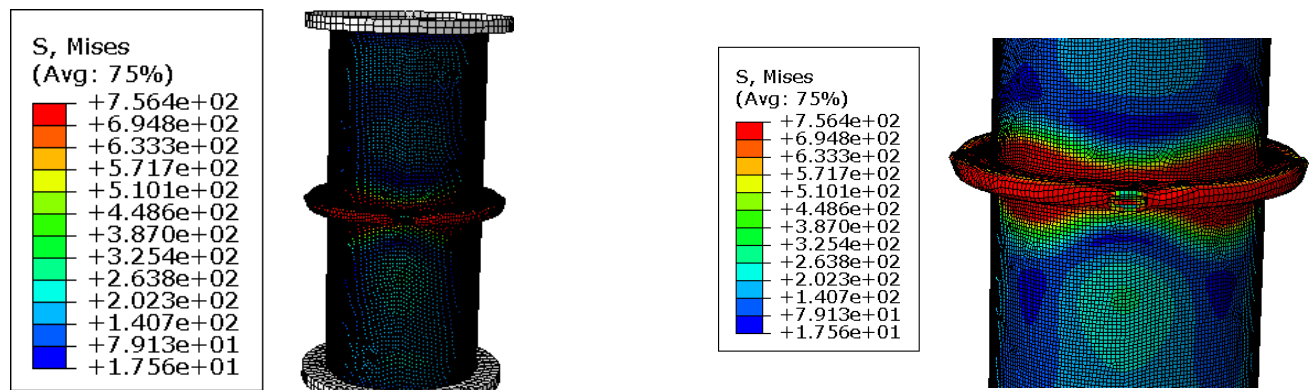


**Figure III.65 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures horizontales à (4faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.3.2.4 Huit rainures à (4faces/2lignes)

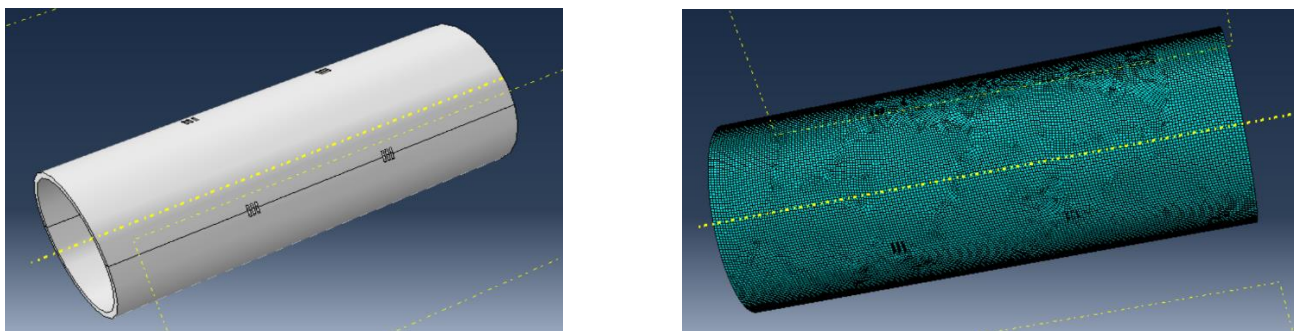


**Figure III.66:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 08 rainures horizontales à (4faces/2lignes).

## Les résultats de l'éprouvette

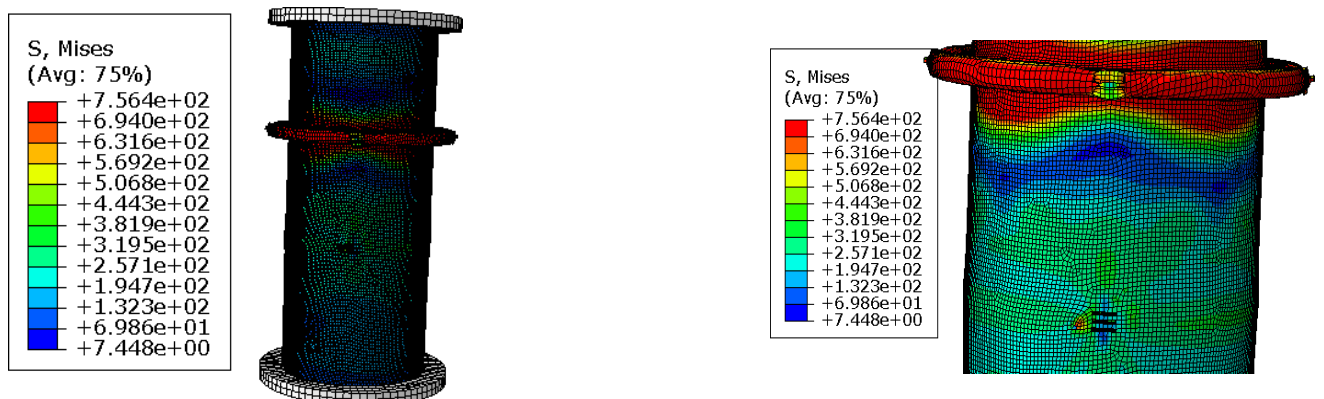


**Figure III.67 :** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 08 rainures horizontales à (4faces/2lignes) après le chargement axial.

Suite à l'analyse des résultats de simulations des rainures horizontales, nous avons observé que le tube perforé avec deux rainures (2faces/1ligne) et celui avec quatre rainures (4 faces/1ligne) présentent une déformation similaire, se manifestant par la formation d'un seul lobe au centre du tube. De même, les tubes perforés avec quatre rainures (2faces/2 lignes) et huit rainures (4faces/2 lignes) montrent également une déformation similaire avec la formation d'un seul lobe sur la première ligne des rainures.

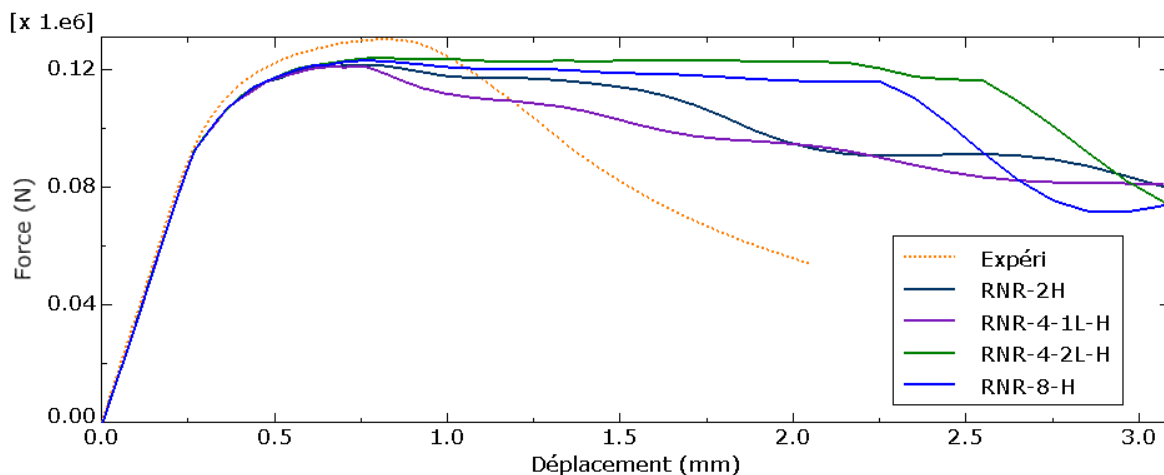


**Figure III.68 :** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en forme des rainures horizontales.

Après avoir comparé les courbes de force-déplacement des tubes perforés avec différentes configurations de rainures horizontales à la courbe expérimentale, nous avons observé que le tube comportant quatre rainures horizontales (deux faces sur deux lignes) atteint une force maximale supérieure. Cela indique qu'il a absorbé plus d'énergie.

### III.4.3.3 Les rainures inclinées

Dans cette partie, nous avons créé des rainures inclinées à un angle de  $45^\circ$  ayant les mêmes dimensions que les ellipses précédentes

#### III.4.3.3.1 Deux rainures inclinées (2 faces/1 ligne)

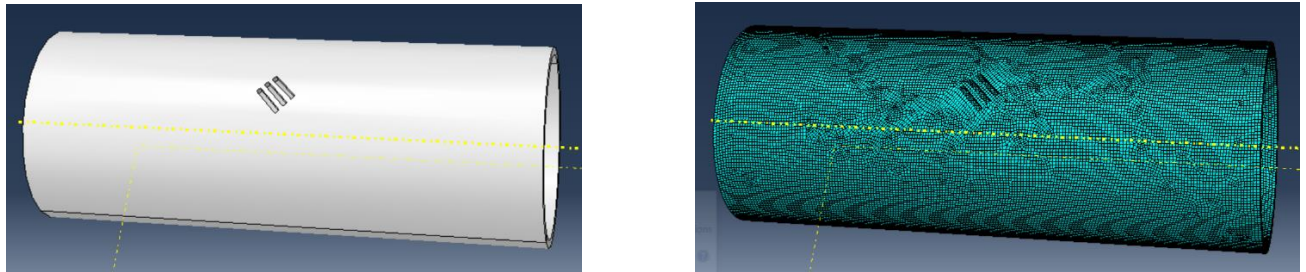


**Figure III.69:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de rainures inclinées à  $45^\circ$  (2faces/1ligne).

### Les résultats de l'éprouvette

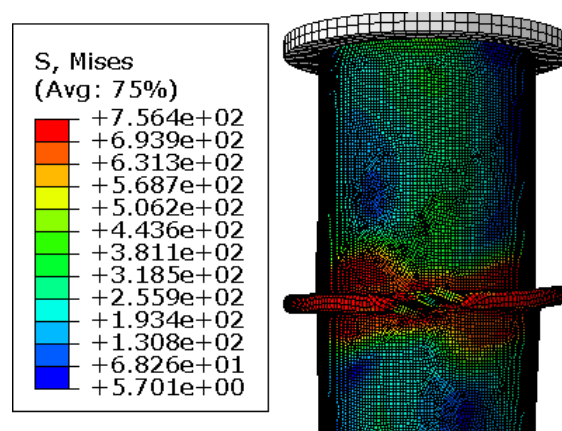


**Figure III.70:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de rainures à  $45^\circ$  (2faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.3.3.2 Quatre rainures inclinées (2 faces/2 ligne)

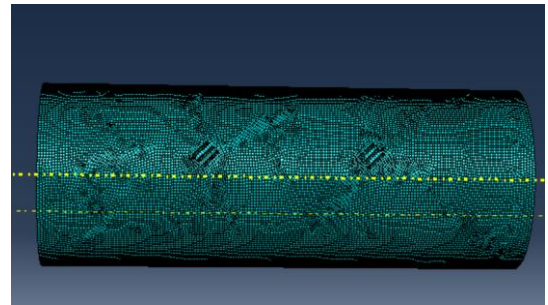
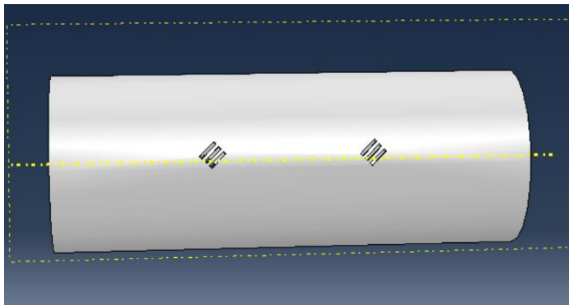


**Figure III.71 :** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 04 rainures inclinées à (2faces/2ligne).

## Résultats de l'éprouvette

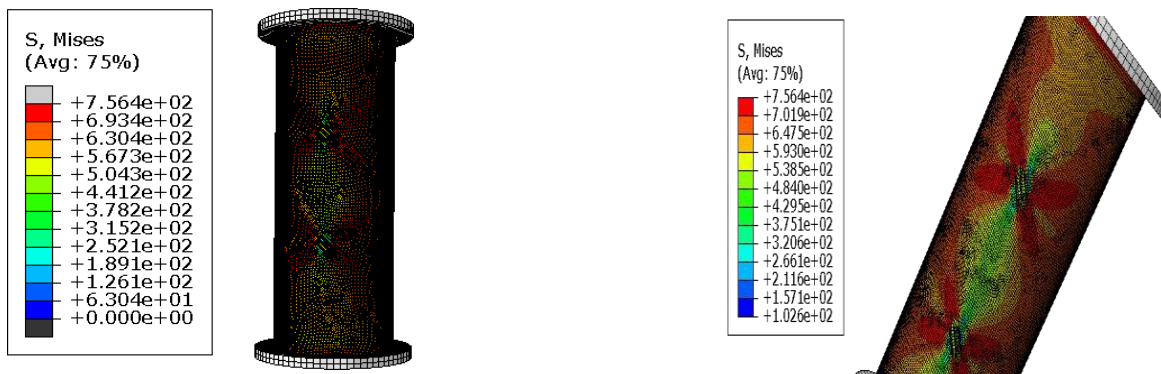


**Figure III.72:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 04 rainures inclinées à (2faces/2lignes) après le chargement axial.

## III.4.3.3.3 Quatre rainures inclinées (4 faces/1 ligne)

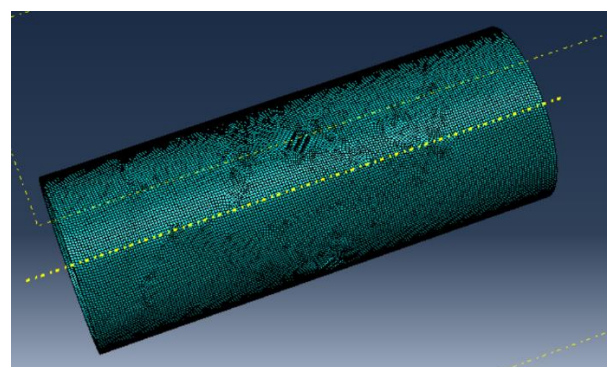
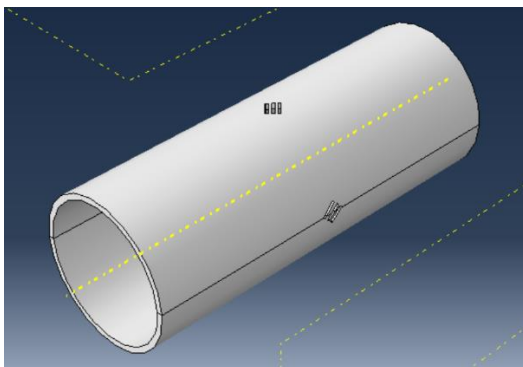


**Figure III.73:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 04 rainures inclinées à (4faces/1ligne).

## Résultats de l'éprouvette

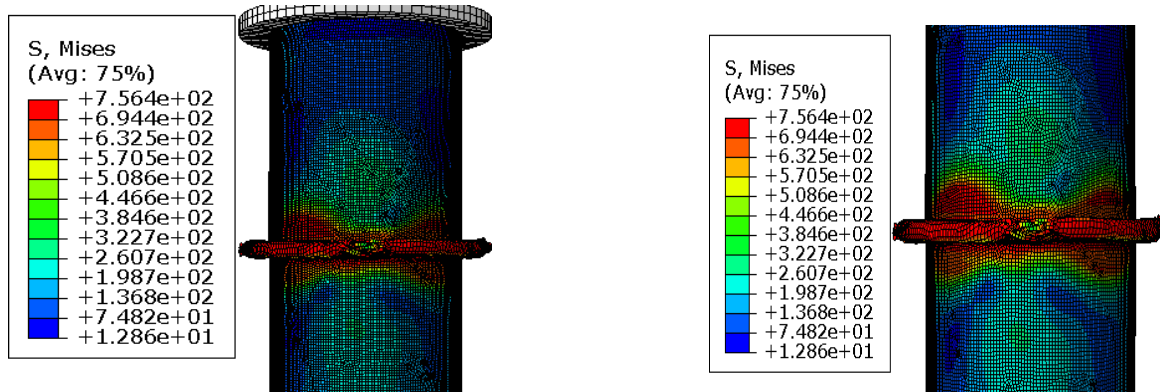


**Figure III.74:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 04 rainures inclinées à (4faces/1ligne) après le chargement axial.

## III.4.3.3.4 Huit rainures inclinées (4 faces/2 lignes)

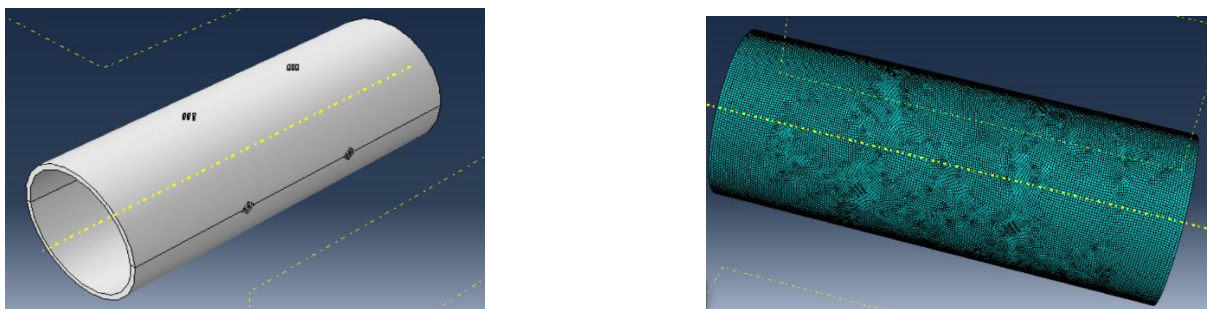


**Figure III.75:** vue schématique de l'expérience des éprouvettes de 08 rainures inclinées à (4faces/2ligne).

## Résultats de l'éprouvette

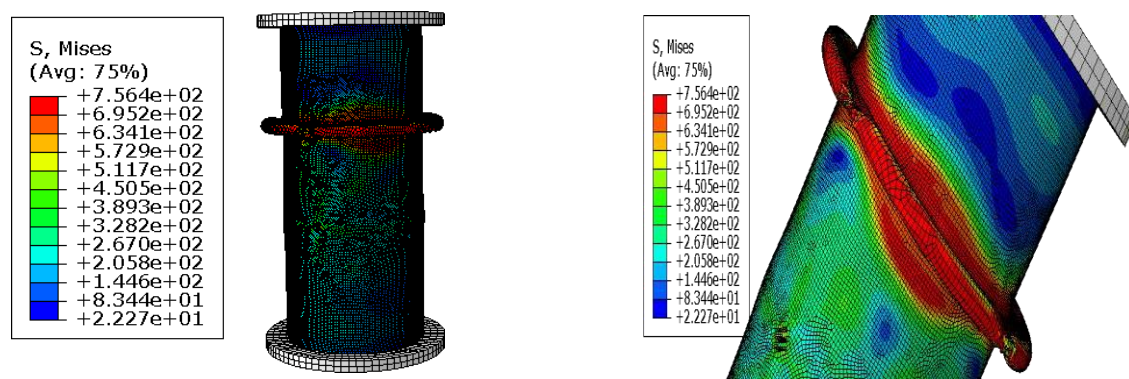


**Figure III.76:** Contour des contraintes de Von mises sur l'éprouvette de 08 rainures inclinées à (4faces/2ligne) après le chargement axial.

D'après les résultats présentés dans les figures précédentes, nous avons observé que le tube perforé avec 2 rainures inclinées (2 faces sur 1 ligne) et celui avec 4 rainures (4 faces sur 1 ligne) présentent une déformation avec un seul lobe au milieu du tube. En revanche, le tube perforé avec 4 rainures (2 faces sur 2 lignes) n'a montré aucune déformation. À la fin, le tube perforé avec 8 rainures (4 faces sur 2 lignes) présente une déformation avec un seul lobe sur la première ligne de rainures, tandis que la deuxième ligne est restée sans déformation.

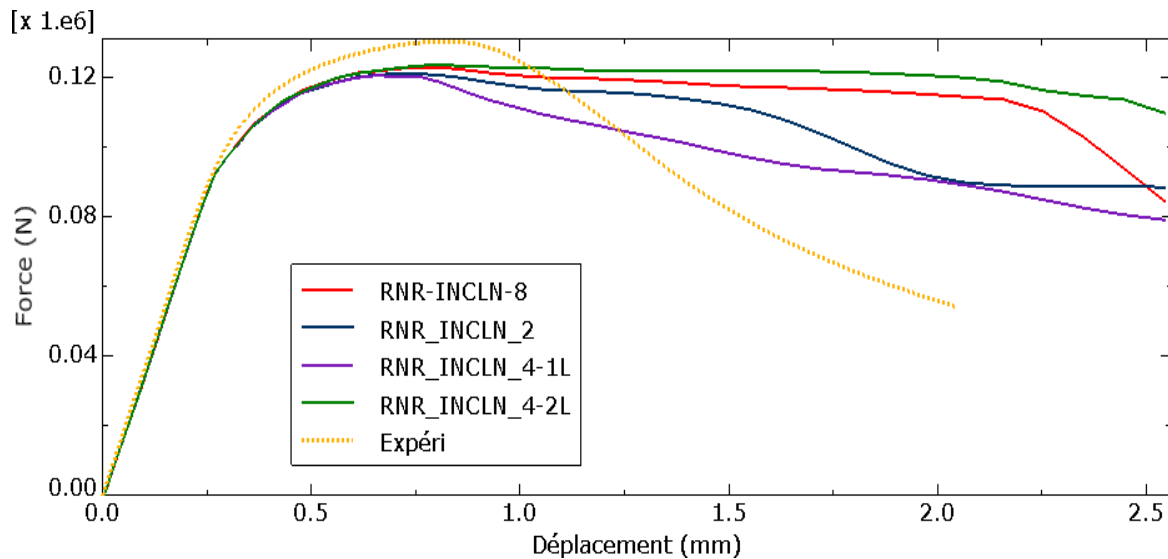


**Figure III.77:** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé par des rainures inclinées avec la courbe force-déplacement expérimentale.

Après avoir comparé les courbes de force-déplacement des tubes perforés avec différentes configurations de rainures inclinées à la courbe expérimentale, nous avons observé que le tube comportant quatre rainures inclinées (deux faces sur deux lignes) atteint une force maximale supérieure. Cela indique qu'il a absorbé plus d'énergie.

## Résultats des comparaisons

Les résultats obtenus à partir des diverses comparaisons des courbes force-déplacement des tubes perforés montrent clairement que les configurations avec quatre perforations ou quatre ellipses, réparties sur deux lignes ou faces, ont démontré la capacité la plus élevée à absorber l'énergie. Ces tubes ont présenté des déformations spécifiques qui indiquent une résistance accrue aux charges appliquées, ce qui les rend particulièrement efficaces dans des scénarios où la capacité d'absorption d'énergie est cruciale. Cette conclusion est soutenue par une analyse approfondie des courbes expérimentales, établissant ainsi ces configurations comme les choix les plus performants dans ce contexte d'application spécifique.

### III.5 Comparaison entre les résultats obtenus

Nous avons comparé les caractéristiques des courbes force-déplacement obtenues après avoir appliqué différentes formes de perforations sur le tube 100 mm. Le but est de déterminer quelle configuration de tubes perforés, parmi celles étudiées présente la plus grande résistance ou force maximale, afin de comprendre comment chaque forme affecte les caractéristiques ou les performances de tube. Nous commençons par une comparaison entre tous les cas.

#### III.5.1 Comparaison entre les courbes de différentes formes

Nous avons sélectionné une courbe représentative pour chaque forme, nous les avons analysées individuellement avant de les comparer avec la courbe expérimentale afin de déterminer laquelle offre la meilleure résistance aux chocs.

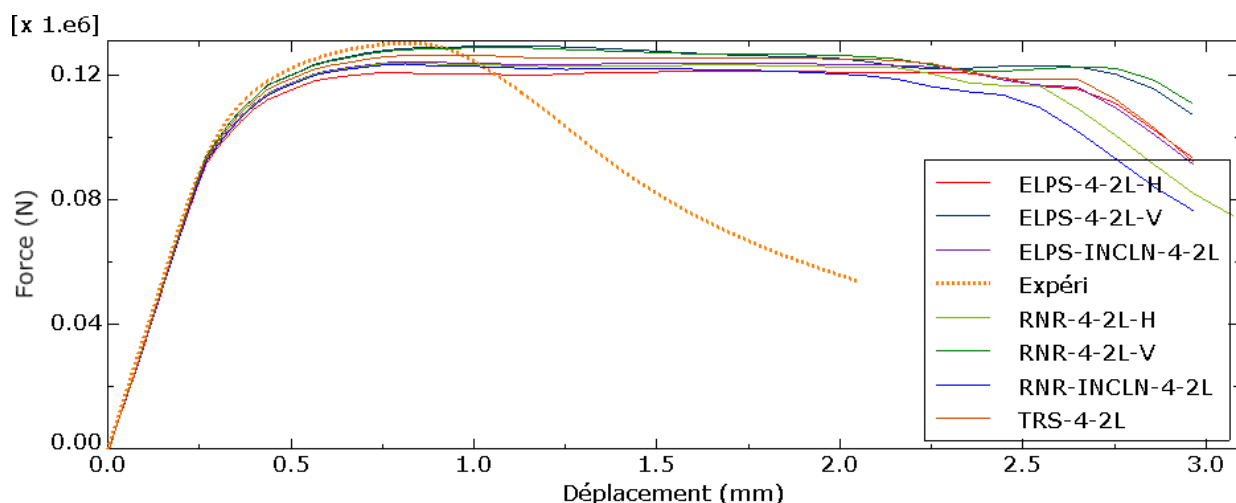


**Figure III.78:** comparaison entre les courbes force-déplacement de tube perforé en différentes formes.

Nous avons sélectionné une courbe représentative pour chaque forme, nous les avons analysées individuellement avant de les comparer avec la courbe expérimentale afin de déterminer laquelle offre la meilleure résistance aux chocs. Nous remarquons sur les courbes que les configurations 4 ellipses verticales et 4 rainures verticales (2faces, 2 lignes) sont les plus efficaces pour l'absorption d'énergie.

### III.6 Ecrasement des tubes sous chargement dynamique

Dans cette section, nous nous intéresserons aux chargements dynamiques [40], [41]. Nous avons donc mené une étude de l'influence de la vitesse de chargement sur l'absorption d'énergies des tubes pour les meilleures configurations des perforations des formes circulaires, ellipses et rainures. Nous avons utilisé trois vitesses d'écrasement pour chaque configuration des structures tubulaires :  $V = 5 \text{ mm/min}$ ,  $V = 50 \text{ mm/min}$  et  $V = 500 \text{ mm/min}$ .

#### III.6.1 Tubes non-perforés

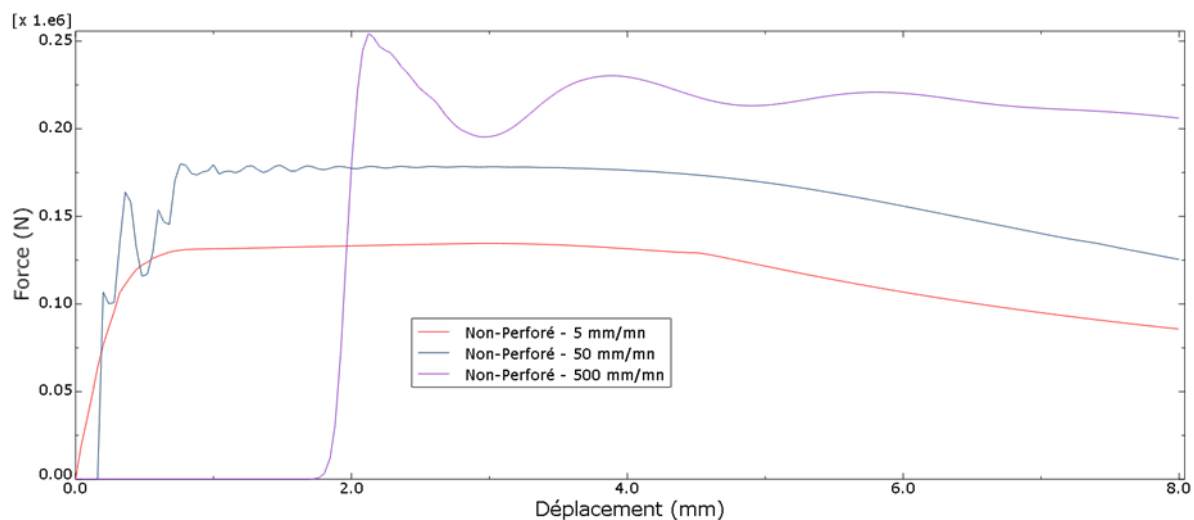


**Figure III.79:** les courbes de la dynamique des tubes non-perforés.

## III.6.2 Tubes perforé

## • Cas 1 : cercles

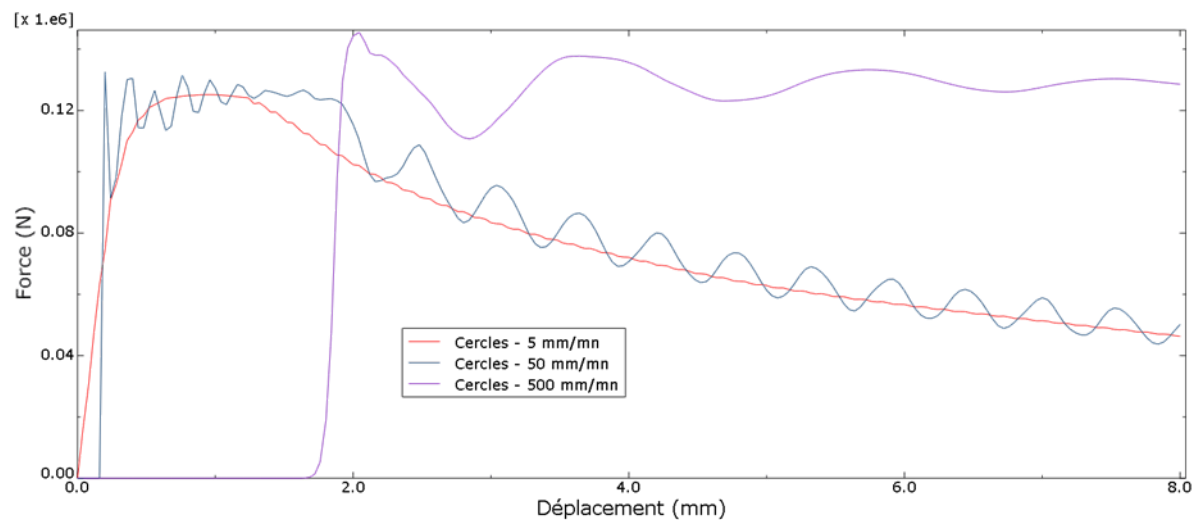


Figure III.80 : les courbes de la dynamique des tubes perforés avec cercles.

## • Cas 2 : Ellipses

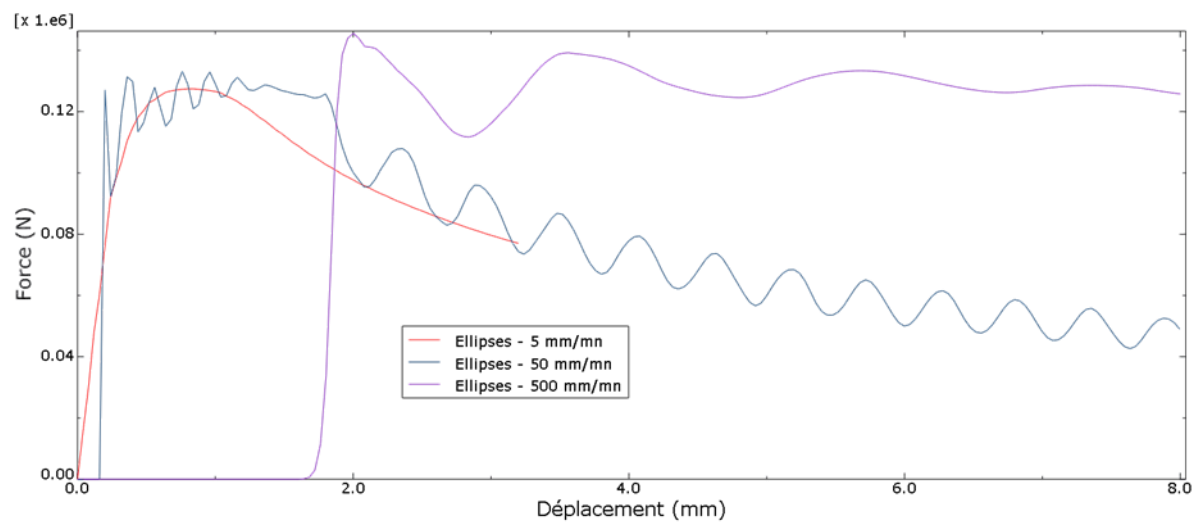


Figure III.81 : les courbes de la dynamique des tubes perforés avec ellipses.

- Cas 3 : Rainures

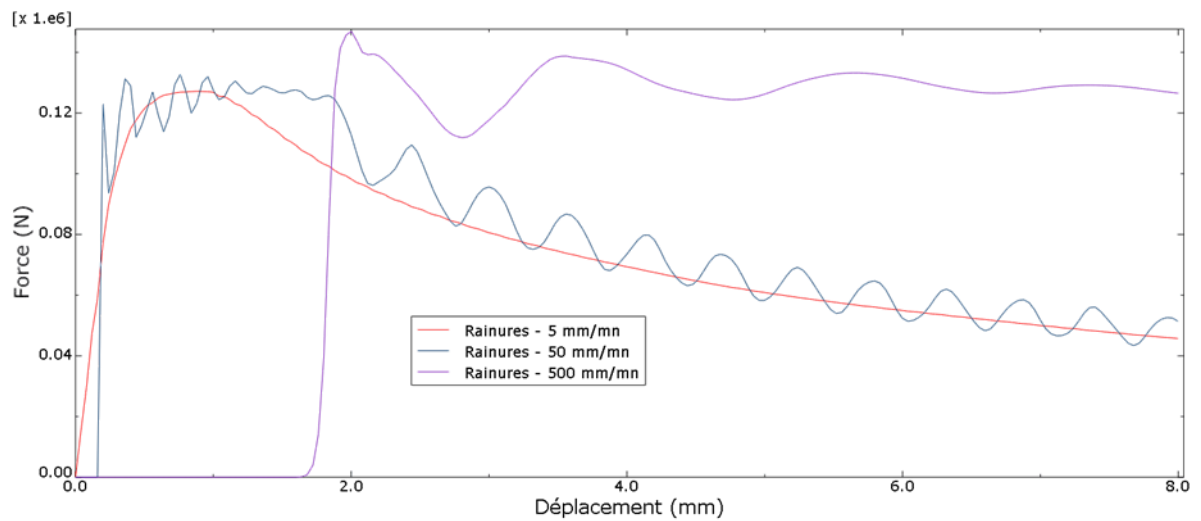


**Figure III.82 :** les courbes de la dynamique des tubes perforés avec ellipses.

**Nous observons :**

1. L'augmentation de la vitesse de chargement induit une augmentation de la force maximale dans tous les cas (configurations).
2. Pour les tubes avec des perforations, cette augmentation est faible entre les vitesses de chargement de 5 mm/mn et 50 mm/mn.
3. Plus la vitesse de chargement augmente plus un retard dans la mesure de l'effort (force de réaction à l'encastrement) apparaît.
4. Pour une vitesse de 500 mm/mn, le comportement devient quasi-fragile.
5. Pour les tubes avec des perforations, des ondulations dans l'évolution de la force apparaissent déjà pour une vitesse de 50 mm/mn.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, notre objectif était d'évaluer numériquement les performances des tubes perforés à l'aide du logiciel Abaqus, en examinant différentes configurations de perforations. Nous avons cherché à déterminer quelle configuration offre la meilleure résistance et capacité d'absorption d'énergie, crucial pour diverses applications industrielles et technologiques.

Ces configurations se sont distinguées par leur capacité à maintenir une intégrité structurelle élevée, ce qui en fait des choix idéaux pour des applications nécessitant robustesse et sécurité.

Parallèlement, nous avons observé des comportements élastiques similaires dans certaines configurations, indiquant une flexibilité et une adaptabilité aux contraintes mécaniques, tout en maintenant des performances élevées dans les simulations numériques avec Abaqus.

En somme, ce chapitre a permis de clarifier les avantages et les applications potentielles des configurations de tubes perforés analysées numériquement avec Abaqus. Ces résultats sont essentiels pour orienter la conception et le développement de solutions innovantes et efficaces, répondant aux défis modernes en ingénierie structurale et mécanique.

## Conclusion Générale

## Conclusion Générale

---

A l'issue de notre travail, nous présentons les conclusions suivantes concernant l'étude du comportement au flambement des structures tubulaires à section circulaire, soumises à un chargement axial. Cette étude s'est déroulée en deux phases distinctes : expérimentale et numérique en utilisant le logiciel Abaqus.

La première étape consistait à sélectionner le matériau et à déterminer la géométrie (longueur) des structures tubulaires de référence. L'analyse est menée sur des éprouvettes tubulaires de section circulaire en acier inoxydable de différentes longueurs. Ces essais d'écrasement nous ont permis de caractériser le matériau et d'effectuer un choix sur la longueur à utiliser dans la suite du travail. Par la suite, des simulations numériques ont été menées sur des éprouvettes de référence non perforées. Cette étape nous a permis d'identifier les paramètres matériau à utiliser dans les simulations en effectuant un calibrage avec les résultats expérimentaux précédemment obtenus. Dans un souci de réduction du poids et dans le but d'analyser l'influence des perforations sur la capacité d'absorption d'énergie, nous avons réalisé des simulations numériques en introduisant des perforations de diverses formes, à l'aide du logiciel Abaqus. Cette approche a permis de démontrer que certains types de perforations sur les tubes peuvent significativement améliorer leur capacité d'absorption d'énergie lors d'impacts, tout en ayant réduit le poids de la structure. Ce résultat important, bien que préliminaire, nous a renforcé dans notre démarche en abordant d'une manière purement numérique les chargements dynamiques,

Ces résultats renforcent la fiabilité des modèles numériques utilisés pour évaluer le comportement des structures tubulaires en acier inoxydables. En confrontant les résultats expérimentaux aux prédictions numériques, nous avons pu non seulement valider nos simulations, mais aussi identifier les comportements et réponses spécifiques dues à la présence des perforations sur l'absorption d'énergie dans ces structures.

Finalement, cette étude dédiée à l'évaluation de la capacité d'absorption d'énergie des structures tubulaires en acier inoxydable, combinant des approches expérimentales et numériques avancées, nous a permis d'explorer les avantages grandioses de la simulation numérique, mais aussi certaines limites à repoussées.



*Références  
bibliographiques*

## Référence bibliographique

---

- [1] Jean Pierre Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz. Introduction à la science des matériaux, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 522 pages, 1999.
- [2] Holm Altenbach, Johannes Altenbach, Wolfgang Kissing. Mechanics of Composite Structural Elements, Second Edition, Springer Nature, 503 pages, 2018.
- [3] Michel MAYA. Mécanique des solides déformables. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre d'Enseignement et de Recherche de CLUNY, 2016.
- [4] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet. P. Combrade. Métallurgie. Du minéral au matériau. Masson, Paris, 1998.
- [5] Guy Murry. Aide-Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris, 2004.
- [6] Heyman, J. Théorie des structures. Paris : Dunod., 2013.
- [7] P. Lüdwick et R. Chen. Stahl und Eisen, 43, pp 999 et 1427, 1923.
- [8] B. Belkessa, “Contribution à l’étude de la cohésion du joint de soudure Hétérogène entre un acier duplex et un acier HSLA ”, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, USTHB, 2017.
- [9] Multhupandi, V., BalaSrinivasan P., Seshadri, S.K, and Sundaresan, S. “Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds”, Materials Science and Engineering, Volume 358, Issues 1–2, Pages 9-16, 2003.
- [10] R. Gunn, “Duplex Stainless Steels—Microstructure, Properties and Applications,” Abington Publishing, Cambridge, 1997. doi:10.1533/9781845698775
- [11] A. C. Messellek, Mohand Ould Ouali, Y. Benabid and A. Beloulla. Material selection process for femoral component of hip prosthesis using finite element analysis and ranking method. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 20(1), pp. 133-134. October 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/10255842.2017.1382897>
- [12] RACHID Baleh. Flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe-système d’absorptions d’énergie-via un nouveau dispositif expérimental. Thèse de doctorat de l’Université de Technologie de Troyes, 2004.
- [13] M. WANG XUGUANG. Comportement à l’écrasement de structures tubulaires en multi-matériaux. Thèse de doctorat de l’École centrale de Lyon année 1991.

## Référence bibliographique

---

- [14] ZEROUKI Marzak. Comportement des métaux multiphasés sous sollicitations dynamique. Prise en compte des transformations métallurgiques. Thèse de doctorat de l'UMMTO, soutenue le 17/01/2023.
- [15] Jean-Mathieu Guimard. Contribution à la modélisation de l'absorption d'énergie dans les composites stratifiés par fragmentation sous sollicitation dynamique. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2009.
- [16] Webographie : site web <https://techautoalgerie.wordpress.com/tag/absorption-de-choc/> consulté 12 septembre 2024.
- [17] Webographie : site web <https://skyciv.com/fr/education/the-importance-of-a-buckling-analysis/> consulté 13 septembre 2024.
- [18] Webographie : site web [https://www.itterbeek.org/uploads/documents/RMChap8\(Flambement\).pdf](https://www.itterbeek.org/uploads/documents/RMChap8(Flambement).pdf) Cours de Résistance des Matériaux – Flambement, consulté 13 juin 2024
- [19] A. Abdul-Latif, A. Ahmed-Ali, R. Baleh, and M. Ould Ouali. Innovative solution for strength enhancement of metallic like-composite tubular structures axially crushed used as energy dissipating devices. *Journal Thin-Walled Structures* (Elsevier), Vol. 119, p. 332–344, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.024>
- [20] S.T.S. Al-Hassani, W. Johnson, W.T. Lowe. Characteristics of inversion tubes under axial loading. *J. Mech. Engng Sci.*, 14 (1972), pp. 370-381.  
[http://dx.doi.org/10.1243/JMES\\_JOUR\\_1972\\_014\\_046\\_02](http://dx.doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1972_014_046_02)
- [21] G. L. Farley, R. M. Jones, Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes, *Journal of Composite Materials* (1992), 37-50.  
<https://doi.org/10.1177/002199839202600103>
- [22] Jean Goulet, Jean-Pierre Boutin, Frédéric Lerouge. Aide-mémoire - résistance des matériaux - 10e éd. Dunod, 2019, 352 pages.
- [23] JEAN-LOUIS FANCHON. Guide des sciences et technologies. AFNOR NATHAN, 2001, 624 pages
- [24] Michel Dupeux. Aide-mémoire science des matériaux DUNOD Paris (2005).

## Référence bibliographique

---

- [25] SAIM. A et BOUZIANE. A. Etude et réalisation d'une machine de traction manuelle, mémoire de master de l'UMMTO. 2017-2018.
- [26] Jean Roux. Résistance des matériaux par la pratique, tome 1. Eyrolles, 437 pages, 1995
- [27] KUETED C. Conception et réalisation d'une machine d'essais de traction-compression et flexion semi-automatique. Mémoire de master de l'université de Ouargla. 2018-2019.
- [28] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design. Butterworth-Heinemann 2020, 586 Pages
- [29] C.D.Thenon, J.Duvalloir, « TRE Instrumentation d'un choc Charpy ». Ecole des mines de Paris, (2002).
- [30] Nancy, Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Éditions 1988.
- [31] Standard method of test for plane strain fracture toughness of metallic materials, A.S.T.M. Standards 1972. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138566910>
- [32] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux. Presses internationales polytechniques, 2007.
- [33] Abderrahim Zeghloul Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture. Cours de l'Université de Lorraine (2016).
- [34] B. CHENAL Péchiney CRV, Écrouissage d'alliages d'aluminium. Techniques de l'ingénieur, Date de publication : 10 juin 1999.
- [35] P. Lüdwik et R. Chen. Stahl und Eisen (Acier et Fer). 43, pp 999 et 1427, 1923
- [36] M. Ould Ouali. Relevance of incorporating cavity shape change in modelling the ductile failure of metals. Mathematical Problems in Engineering. Vol. (2018), Article ID 6454790, 9 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6454790>
- [37] K. Belouettar, M. Ould Ouali, N. Zeroudi, S. Thibaud. Investigation of the influence of incremental sheet forming process parameters using response surface methodology. Metallurgical Research & Technology. Volume 118, Number 4, 2021, 401. <https://doi.org/10.1051/metal/2021039>
- [38] N. Ben Chabane, N. Aguechari, M. Ould Ouali. Study of the slant fracture in solid and hollow cylinders: Experimental analysis and numerical prediction. Frattura ed Integrità Strutturale, Vol. 63 (2023), pp. 169-189. <https://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.63.15>

## Référence bibliographique

---

[39] Trong Son CAO, Pierre-Olivier BOUCHARD. Modèles d'endommagement ductile : Modélisation de l'endommagement ductile en mise en forme des métaux. Techniques de l'ingénieur (Réf : M3033 v1), 2021.

[40] M. Zerouki, M. Ould Ouali and L. Benabou. Metallurgical phase transformation and behaviour of steels under impact loading. Metallurgical and Materials Transactions A (Springer), Vol. 51, pp. 252–262, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05527-z>

[41] M. Dinh Cuong Tran. Interaction rupture-flambage, le cas du «splitting» de tube métallique: approche expérimentale et numérique. Autre. INSA de Lyon, 2012.

## ***Résumé***

L'objectif des études présentées dans notre travail est de favoriser l'amélioration du comportement en cas d'écrasement des structures tubulaires, afin de concevoir une structure qui optimise l'absorption d'énergie en cas de choc.

Ce travail concentre sur la caractérisation des tubes en acier inoxydable. Les essais réalisés à l'unité de recherche MPE ont permis de déterminer les courbes fournies par le logiciel de la machine Zwick/Roel à partir des données de l'essai incluant les courbes conventionnelles force-déplacement. Ces données ont ensuite permis de déduire les courbes contraintes-déformations confirmant ainsi le comportement élastoplastique du matériau.

Après avoir examiné globalement la capacité d'absorption d'énergie des structures tubulaires, nous avons étudié numériquement l'effet du maillage et de l'épaisseur sur le modèle implémenté, aussi l'impact des perforations de différentes formes réalisées sur le tube sélectionné à l'aide du logiciel Abaqus.

## ***Abstract***

The objective of the studies presented in our work is to enhance the crash behavior of tubular structures, aiming to design a structure that optimizes energy absorption during impact. This study focuses on characterizing stainless steel tubes. Tests conducted at the MPE research unit enabled the determination of curves provided by the Zwick/Roel machine software using test data, including conventional force-displacement curves. These data subsequently allowed for the deduction of stress-strain curves, confirming the material's elastoplastic behavior.

After a comprehensive review of the energy absorption capacity of tubular structures, we numerically investigated the effects of meshing and thickness on the implemented model, as well as the impact of differently shaped perforations made on the selected tube using Abaqus software.