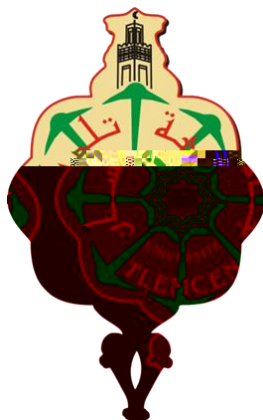


République Algérienne et Démocratique et Populaire  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abou Berk Belkaïd Tlemcen  
Faculté de Technologie



## MEMOIRE

Présenté Pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En Génie Mécanique

**Spécialité** : Assemblages Soudés et Matériaux

Par : **FENDI Nour Elhouda**

Sujet

# Étude Expérimentale et Modélisation de l'Essai de Traction d'un Joint de Soudure pour l'Acier de Pipeline API 5L

Soutenu publiquement, le 10/06 /2024, devant le jury composé de :

|                         |         |                       |              |
|-------------------------|---------|-----------------------|--------------|
| Mr. BENACHOUR Mustapha  | Pr      | Université de Tlemcen | Président    |
| Mr. GUENIFED Abdelhalim | MAA     | Université de Tlemcen | Examinateur  |
| Mr. SIFI Miloud         | Docteur | Socio- économique     | Examinateur  |
| Made. OURRAD Soumia     | MAA     | I2E                   | Examinateur  |
| Mr. BENHAMEL Abdelhamid | MAA     | ESSA Tlemcen          | Encadreur    |
| Mr. HADJOUI Fethi       | MCA     | Université de Tlemcen | Co-Encadreur |

Année universitaire 2023/2024

## REMERCIEMENTS

D'abord et avant tout je remercie ALLAH le tout puissant pour ces faveurs  
et ses bontés,

Je tiens à remercier sincèrement mon superviseur, Mr HADJOU Felhi  
et BERNARD Abdelhamid pour leurs précieux conseils et leur  
expérience tout au long de mon travail.

De plus, je remercie sincèrement mes amis, Surtout ma copine HAYAT  
Kawther qui m'ont apporté un soutien moral, des encouragements et de la  
camaraderie pendant les périodes difficiles. Votre amitié et votre solidarité ont  
rendu ce voyage plus agréable et mémorable.

Enfin et surtout, je dois une dette de gratitude à ma famille pour leur amour  
inconditionnel, leurs encouragements et leur croyance en mes capacités. Leur  
soutien indéfectible a été la pierre angulaire de mes études, et je suis vraiment  
béni de les avoir à mes côtés.

Merci.

# RÉSUMÉ

Ce mémoire examine les propriétés mécaniques des matériaux soudés en utilisant des essais de traction et des simulations avec le logiciel Abaqus. L'objectif principal est d'analyser le comportement mécanique des matériaux soudés, de comprendre les critères de plasticité, ainsi que de modéliser les résultats expérimentaux par des simulations.

Les éprouvettes ont été réalisées à partir de métaux de base et de métaux d'apport selon une procédure de soudage définie, puis testées par des essais de traction pour déterminer des propriétés. Les résultats des essais ont été interprétés pour identifier les courbes de contrainte-déformation et les comportements mécaniques spécifiques.

Ensuite, les résultats expérimentaux ont été simulés à l'aide d'Abaqus. Les simulations ont confirmé la validité des résultats expérimentaux, montrant une bonne corrélation entre les données observées et les données modélisées.

**Mots clés** : *essai de traction, Abaqus, joins de soudure, API 5L acier des pipelines, simulation numérique.*

# ABSTRACT

This thesis examines the mechanical properties of welded materials using tensile tests and simulations with the Abaqus software. The main objective is to analyse the mechanical behaviour of welded materials, to understand the plasticity criteria, as well as to model the experimental results by simulations.

The test pieces were made from base metals and filler metals according to a defined welding procedure and tested by tensile tests to determine properties. The test results were interpreted to identify stress-strain curves and specific mechanical behaviours.

Then, the experimental results were simulated using Abaqus. The simulations confirmed the validity of the experimental results, showing a good correlation between the observed and modelled data.

**Keywords:** *tensile test, Abaqus, weld joints, API 5L pipeline steel, numerical simulation,*

## المخلص

ة ث نحن ي جد جسد قمقأ ه نه لدا تجل حقاد ب  
ثقب التجل امت Abaqus م نه ة ث ه قمق  
ه نه لدا مك ل مء قم مبحث لة ت ا ل ثقب  
لحة سلطف لأحعاد لل ط م ي ئ ل ط م نه ف ث ثل لث  
حقاد ن ل حقاد ب ة ث جسد لحة مة لأححاد ة ث  
للا ب ثم ه ق ب قمقأ ثب  
لحة اللثب لة ت ا ل ا تجل Abaqus ق ب ب ثقب شدئ  
للة ت ا ل ا ب ط ب دقا ث ال ام ب شهب ام ب ل لخذئ

الكلمات الرئيسية حقاد Abaqus ل شد ثل ه لأحد ما API 5L  
لثقب ل

# Liste des figures

## Chapitre 1 :

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1. 1 :</b> diagramme charge-allongement de traction [3].....                           | 7  |
| <b>Figure 1. 2 :</b> Critère de Tresca.....  | 11 |
| <b>Figure 1. 3:</b> Courbe contrainte-déformation du comportement fragile [14] .....             | 12 |
| <b>Figure 1. 4 :</b> Courbe contrainte-déformation du comportement ductile [14].....             | 13 |
| <b>Figure 1. 5 :</b> Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire [14] . | 13 |

## Chapitre 2 :

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| <b>Figure 2. 1:</b> Géométrie de la section du joint.....          | 17                                  |
| <b>Figure 2. 2 :</b> le de pipeline soudé .....                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| <b>Figure 2. 3 :</b> fraiseuse universelle WEYRAUCH FR-U-1100..... | 18                                  |
| <b>Figure 2. 4 :</b> le découpage d'échantillons.....              | 18                                  |
| <b>Figure 2. 5 :</b> designs de l'échantillons.....                | 18                                  |
| <b>Figure 2. 6 :</b> photo de l'échantillons.....                  | 19                                  |
| <b>Figure 2. 7 :</b> photo usinage de l'éprouvettes .....          | 19                                  |
| <b>Figure 2. 8:</b> designs des éprouvettes .....                  | 19                                  |
| <b>Figure 2. 9 :</b> photo des éprouvettes finaux .....            | 20                                  |

## Chapitre 3 :

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 3. 1:</b> la Machine de traction 600 KN.....   | 22 |
| <b>Figure 3. 2 :</b> éprouvette de traction avant la rupture dans la machine de traction ..... | 23 |
| <b>Figure 3. 3 :</b> Logiciel pilote de la machine de traction .....                           | 23 |
| <b>Figure 3. 4 :</b> Les étapes d'évolution de l'éprouvette durant sa traction. ....           | 24 |
| <b>Figure 3. 5 :</b> Les éprouvettes soudées après la rupture : .....                          | 24 |
| <b>Figure 3. 6 :</b> courbes de charge déplacement pour les trois éprouvettes.....             | 25 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 4. 26 :</b> Visualisation de déformations pour $\epsilon :20$ .....                                    | 43 |
| <b>Figure 4. 27 :</b> Visualisation de déformations pour $\epsilon :25$ .....                                    | 43 |
| <b>Figure 4. 28 :</b> Comportement d'édition.....  | 44 |
| <b>Figure 4. 29 :</b> Modélisation des courbes réel .....  | 44 |
| <b>Figure 4. 30 :</b> Contraintes maximales en fonction de l'allongements .....                                  | 46 |
| <b>Figure 4. 31 :</b> Illustration de la courbe rationnelle et conventionnelle du matériau de base x42.<br>..... | 47 |
| <b>Figure 4. 32 :</b> Illustration de la courbe rationnelle et conventionnelle du matériau soude .....           | 47 |

## Liste des tableaux

### Chapitre 2 :

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1 :</b> composition chimique (% pondéral) de l'acier API 5L X42 .....     | 15 |
| <b>Tableau 2 :</b> caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X42 .....           | 15 |
| <b>Tableau 3 :</b> Analyse chimique du métal d'apport E610 et E7010 .....            | 14 |
| <b>Tableau 4 :</b> Caractéristiques mécaniques du métal d'apport E610 et E7010 ..... | 15 |
| <b>Tableau 5 :</b> Caractéristiques électriques du procédé du soudage.....           | 16 |

## Nomenclature des symboles

|                |  |                    |
|----------------|--|--------------------|
| L              | : Longueur instantanée .....                   | (mm)               |
| L <sub>0</sub> | : Longueur entre repère .....                  | (mm)               |
| A%             | : Allongement relatif total .....              | (%)                |
| ε%             | : Allongement relatif .....                    | (%)                |
| Re             | : Résistance à la traction .....               | (MPa)              |
| σ              | : contrainte .....                             | (MPa)              |
| Rm             | : Résistance à la rupture .....                | (MPa)              |
| F              | : Force appliquée .....                        | (N)                |
| Lu             | : Longueur de l'éprouvette après rupture ..... | (mm)               |
| Su             | : Diamètre après rupture .....                 | (mm)               |
| E              | : Module d'Young.....                          | (MPa)              |
| A <sub>0</sub> | : surface de l'éprouvette initiale .....       | (mm <sup>2</sup> ) |
| S              | : Surface instantanée de l'éprouvette.....     | (mm <sup>2</sup> ) |
| K              | : coefficient de résistance.....               | (Mpa)              |

# TABLE DES MATIERES

|  |      |
|--|------|
| REMERCIEMENTS .....                                    | I    |
| RÉSUMÉ .....   | II   |
| ABSTRACT.....  | III  |
| الملخص.....  | IV   |
| LISTE DES FIGURES .....                                | V    |
| LISTE DES TABLEAUX.....                                | VII  |
| NOMENCLATURE DES SYMBOLES.....                         | VIII |
| TABLE DES MATIERES .....                               | IX   |
| INTRODUCTION GENERALE .....                            | 1    |
| INTRODUCTION GENERALE .....                            | 2    |
| CHAPITRE 01 :ESSAIS MECANQUES - ESSAI DE TRACTION..... | 4    |
| 1 ESSAI DE TRACTION.....                               | 5    |
| 1.1 Définition .....                                   | 5    |
| 1.2 Principe.....                                      | 6    |
| 1.3 Courbe de traction.....                            | 6    |
| 1.4 Loi de Hooke .....                                 | 8    |
| 1.5 Module de Young.....                               | 8    |
| 1.6 Coefficient de poisson .....                       | 9    |
| 2 CONTRAINTES RESIDUELLES .....                        | 9    |
| 2.1 Définition .....                                   | 9    |
| 2.2 Types de contraintes résiduelles .....             | 10   |
| 3 CRITERE DE PLASTICITE .....                          | 10   |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.1      | Critère de Tresca .....                               | 10        |
| 3.2      | Critère de Von-Mises.....                             | 11        |
| <b>4</b> | <b>COMPORTEMENTS MECANIQUES .....</b>                 | <b>12</b> |
| 4.1      | Comportement fragile .....                            | 12        |
| 4.2      | Comportement ductile.....                             | 13        |
| 4.3      | Comportement non linéaire.....                        | 13        |
|          | <b>CHAPITRE 02 :REALISATION DES ÉPROUVETTES .....</b> | <b>14</b> |
| <b>1</b> | <b>INTRODUCTION .....</b>                             | <b>15</b> |
| <b>2</b> | <b>PRESENTATION DU MATERIAU UTILISE .....</b>         | <b>15</b> |
| 2.1      | Métal de base.....                                    | 15        |
| 2.2      | Métaux d'apport.....                                  | 15        |
| <b>3</b> | <b>PROCEDURE DE SOUDAGE.....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>4</b> | <b>ÉTAPES DE REALISATION DES EPROUVETTES .....</b>    | <b>17</b> |
| 4.1      | Découpage des éprouvettes .....                       | 17        |
| 4.2      | Usinage des éprouvettes .....                         | 19        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSION .....</b>                               | <b>20</b> |
|          | <b>CHAPITRE 03 : PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>        | <b>21</b> |
| <b>1</b> | <b>LA MACHINE DE TRACTION.....</b>                    | <b>22</b> |
| <b>2</b> | <b>PROTOCOLE.....</b>                                 | <b>23</b> |
| <b>3</b> | <b>PRESENTATION DES RESULTATS :.....</b>              | <b>25</b> |
| 3.1      | Graphe des essais de traction : .....                 | 25        |
| 3.2      | Interprétation.....                                   | 25        |
| <b>4</b> | <b>LES COURBES DE CONTRAINTE DEFORMATION.....</b>     | <b>26</b> |
| 4.1      | Interprétation.....                                   | 26        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSION</b> .....                                      | <b>27</b> |
|          | <b>CHAPITRE 04 : SIMULATION</b> .....                        | <b>28</b> |
| <b>1</b> | <b>DEFINITION D’ABAQUS</b> .....                             | <b>29</b> |
| <b>2</b> | <b>METHODOLOGIE DE MODELISATION STATIQUE</b> .....           | <b>30</b> |
| 2.1      | Module PART .....  | 30        |
| 2.2      | Module PROPRETY .....  | 32        |
| 2.3      | Module assembly.....   | 35        |
| 2.4      | Module Step.....   | 35        |
| 2.5      | Module Load .....  | 36        |
| 2.6      | Maillage .....   | 38        |
| 2.7      | Module JOB .....   | 40        |
| 2.8      | Module Visualisation .....                                   | 41        |
| 2.9      | Modélisation des courbes réel par Abaqus calibration : ..... | 44        |
| <b>3</b> | <b>MODELISATION DYNAMIQUE (DYNAMIC EXPLICIT)</b> .....       | <b>45</b> |
| <b>4</b> | <b>ANALYSE</b> .....   | <b>46</b> |
| 4.1      | Interprétation.....  | 46        |
| 4.2      | Interprétation.....  | 47        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSION</b> .....                                      | <b>49</b> |
|          | <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....                             | <b>51</b> |

---

## Introduction générale

---

# Introduction générale

Les pipelines jouent un rôle essentiel dans le transport de fluides tels que le pétrole et le gaz naturel sur de longues distances. La fiabilité et la durabilité de ces infrastructures sont cruciales pour garantir un approvisionnement continu et sûr. L'un des éléments critiques de ces structures est le joint de soudure, où deux sections de tube sont fusionnées. La qualité de ces soudures influe grandement sur la performance mécanique globale du pipeline.

Le standard API 5L spécifie les exigences pour les aciers utilisés dans les pipelines. Ces aciers sont sélectionnés en fonction de leurs propriétés mécaniques favorables, notamment leur résistance à la traction, leur ductilité et leur résistance à la fracture. Cependant, la soudure de ces aciers présente des défis importants, notamment en termes de contrôle des paramètres de soudage pour éviter les défauts et garantir l'uniformité de la soudure.

Ce mémoire vise à approfondir notre compréhension des comportements mécaniques des joints de soudure dans les pipelines en acier API 5L. L'objectif est double : mener des essais expérimentaux pour évaluer la résistance à la traction des joints de soudure et développer des modèles numériques pour prédire les performances de ces soudures dans différentes conditions de charge.

Pour mener à terme mon le mémoire de mon projet de fin d'étude, le manuscrit ainsi établi a été scindé en quatre chapitres :

- Une introduction générale
- Le premier chapitre dans lequel on présente les essais mécaniques et en particulier l'essais de traction.
- Le deuxième chapitre est la démarche suivie pour la réalisation des éprouvettes au niveau de hall de technologie.
- Le troisième chapitre montre la partie expérimentale des essais de traction sur les différentes éprouvettes réalisées.

- Le quatrième chapitre est une simulation numérique effectuée sur le logiciel Abaqus, afin de visualiser les résultats obtenus et faire une comparaison avec le travail expérimental.
- Une conclusion générale pour finir suivie d'une perspective.

---

## Chapitre 01

Essais Mécaniques -



## 1.2 Principe

Un essai de traction classique consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique à une charge axiale de traction  $P$ . Un extensomètre axial (ou jauge de déformation) est fixé en deux points M et N séparés, avant l'essai, d'une distance  $L_0$ . Après l'application de la charge, cette distance  $L_0$  se trouve augmentée d'une valeur  $\delta$ . Un autre extensomètre peut également mesurer le déplacement radial, car le rayon originel  $r_0$  se trouve diminué  $\delta r$  (la section originale  $A$  est par conséquent réduite de  $\Delta A$ ). L'essai de traction fournit des renseignements qui permettent de caractériser le matériau. On représente le résultat d'un essai de traction en traçant une courbe appelée "essai de traction" caractérisée par la contrainte normale  $\sigma$  mise en ordonnée (axe des y) et la déformation unitaire  $\varepsilon$  en abscisse (axe des x) où la contrainte normale est [1] :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Et la déformation

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

## 1.3 Courbe de traction

Une courbe contrainte-déformation est une représentation graphique du comportement d'un matériau soumis à des charges croissantes. Des courbes contrainte-déformation peuvent être générées pour étudier le comportement d'un matériau lorsque tout type de charge (traction, compression, cisaillement, flexion, torsion) est appliqué. [2] (voire la figure 1.1)

Nous nous concentrerons toutefois uniquement sur les courbes de contrainte-déformation générées par les charges de traction. Où la courbe tracée est de la forme :  $\sigma$  (MPa) =  $f$  ( $\varepsilon$  (%))

**O-A Zone élastique :** Dans cette phase, le matériau se déforme élastiquement en réponse à la contrainte appliquée. Cela signifie que la déformation est réversible et que le matériau reprendra sa forme initiale lorsque la charge sera retirée.

**A-B Limite d'élasticité :** C'est le point où la déformation élastique devient plastique. Si la charge est enlevée avant d'atteindre ce point, le matériau reviendra à sa forme originale sans déformation permanente. Si la charge continue, la déformation plastique commence.

**B-C Zone de déformation plastique :** Dans cette phase, le matériau subit une déformation plastique et la déformation devient permanente. Le stress peut augmenter sans que la tension augmente proportionnellement.

**Après C fracture :** Point où le matériau se brise. La rupture peut être ductile (étirement du matériau avant rupture) ou fragile (rupture sans grande déformation préalable). [3]

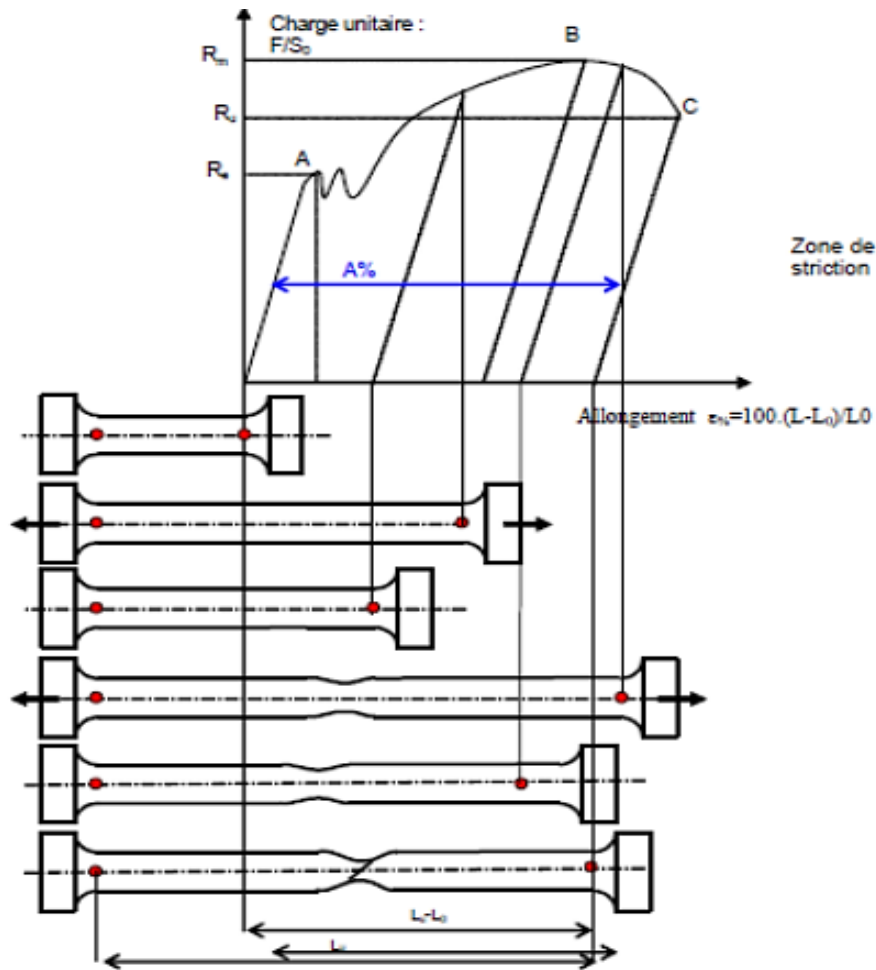


Figure 1. 1 : Diagramme charge-allongement de traction [3]

**Limite d'élasticité  $R_e$**  : point d'élasticité est similaire à la limite élastique de la courbe contrainte-déformation en ce qu'il décrit également le point où la déformation élastique se termine et la déformation plastique commence. La principale différence entre les deux est que le point d'élasticité est une valeur calculée qui décrit précisément la limite élastique ou la limite d'élasticité du matériau. Le point d'élasticité est déterminé en décalant la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation de +0,2 % le long de l'axe horizontal (déformation). Le point d'intersection de la ligne de décalage avec la courbe contrainte-déformation d'origine est considéré comme la limite d'élasticité du matériau.

**Point de contrainte ultime  $R_m$**  : ou résistance à la traction ultime, est la contrainte la plus élevée observée sur la courbe contrainte-déformation. Une fois que la résistance à la traction ultime est atteinte, le spécimen d'essai commence à « cou ». Il est important de noter que bien que le point de contrainte ultime soit le point le plus élevé observé sur la courbe contrainte-déformation, la contrainte la plus élevée réelle est en fait la contrainte réelle à la fracture.

## 1.4 Loi de Hooke

Dans la première partie rectiligne de la courbe, il y a proportionnalité entre la contrainte et la déformation, c'est la loi de HOOKE, qu'il est un principe fondamental en mécanique des matériaux, décrivant le comportement élastique des matériaux déformables.

Formulée par le physicien britannique Robert Hooke au XVIIe siècle, elle établit une relation linéaire entre la force appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte. Il n'est valable que dans la limite élastique du matériau, qui est le point auquel le matériau commence à se déformer plastiquement.

La mesure de la rigidité d'un matériau, avec des valeurs plus élevées indiquant des matériaux plus rigides et des valeurs plus faibles indiquant des matériaux plus flexibles. Cependant, la loi de Hooke a des limites, car elle suppose une relation linéaire, qui peut ne pas s'appliquer à de grandes déformations ou à certains matériaux.

## 1.5 Module de Young

Le module Young, également connu sous le nom de module de traction, est une constante mesurable qui établit la relation entre la contrainte de traction et le début de la déformation dans un matériau élastique, permet de décrire son comportement du matériau en traction et en compression.

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. La loi d'élasticité est la loi de Hooke [4] :

$$\sigma = E \epsilon \quad (3)$$

$$\text{Avec : } \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Où :

- $\sigma$  est la contrainte (en unité de pression),
- $E$  est le module de Young (en unité de pression),
- $\epsilon$  est l'allongement relatif (adimensionnel)

D'après l'équation aux dimensions, le module de Young est homogène à une pression, ou plus précisément une contrainte. L'unité internationale est donc le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général donné en méga pascal (MPa) ou newton par millimètre carré (N/mm<sup>2</sup>).

## 1.6 Coefficient de poisson

Le coefficient principal de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Désigné par la lettre grecque  $\nu$

Ce coefficient a été mis en évidence analytiquement par Denis Poisson, mathématicien Français (1781 - 1840), auteur de travaux sur la physique mathématique et la mécanique, qui en détermina la valeur à partir de la théorie moléculaire de la constitution de la matière. Il est défini par la formule [5] :

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon} \quad (5)$$

En notant

- $\epsilon$  allongement longitudinal)
- $\epsilon_r$  l'allongement transversale.

Le coefficient de Poisson est toujours inférieur ou égal à 1/2. S'il est égal à 1/2, le matériau est parfaitement incompressible. [6].

## 2 Contraintes résiduelles

Souvent appelées contraintes internes à tort et par abus de langage (toutes les contraintes sont en effet internes au matériau), les contraintes résiduelles ont un caractère permanent. Dans certains cas, elles sont introduites dans les matériaux intentionnellement afin qu'elles se retranchent aux contraintes appliquées (généralement des contraintes de compression). [7]

### 2.1 Définition

On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques qui ne sont soumises à aucun effort extérieur. [8]

En d'autres mots, les contraintes résiduelles sont des contraintes auto-équilibrées présentes dans le matériel sous des conditions de température uniforme et sans aucune force externe. [9]

## 2.2 Types de contraintes résiduelles

Les pièces rigides, qu'elles soient métalliques ou non (telles que le bois, les polymères, le verre, la céramique, etc.), présentent des contraintes résiduelles. Ces contraintes reflètent l'histoire métallurgique ou mécanique de chaque point ainsi que de l'ensemble de la pièce tout au long de son processus de fabrication. [10]

Les contraintes résiduelles peuvent être classées en fonction de l'échelle de grandeur auxquelles elles sont significatives et selon les techniques de mesure utilisées pour les étudier.

- **Contraintes résiduelles d'ordre macroscopiques (1er ordre)** : se situent à l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par diffraction des rayons X.
- **Contraintes dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du cristal (grain) (2eme ordre)** : pendant les contraintes mécaniques certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement et provoquent une hétérogénéité dans le comportement, conduisant à des états de contraintes résiduelles non nuls. La moyenne de ces contraintes, suivant l'axe de tension, sera nulle à la fin de l'essai, qui peut être mesurée par diffraction des rayons X.
- **Les contraintes à l'échelle cristalline (3ème ordre)** sont des actions résultant de divers types de défauts cristallins, y compris les lacunes, les atomes interstitiels, les atomes de substitution, les dislocations, les défauts d'empilement, les macles et les joints de grain

## 3 Critère de plasticité

On appelle critère de plasticité, une loi définit explicitement la forme de la surface de plasticité. Les critères de plasticité ont été initialement développés pour les métaux et ont ensuite été utilisés pour les sols, notamment en tant que critères de rupture. [11]

### 3.1 Critère de Tresca

Le critère de Tresca, développé par le scientifique français Henri Tresca dans 1864, prédit la déformation plastique sous contrainte. Basé sur la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), il calculée comme la moitié de la différence entre les contraintes principales maximales et minimales.

Ce critère s'applique plutôt aux matériaux ductiles, des essais sur des matériaux ductiles confirment que le début de la plastification en traction a lieu suivant des plans inclinés à 45° par rapport à la direction de chargement, cette direction correspond à un état de contrainte de cisaillement maximum et ( $\tau_e$ ) est la contrainte tangentielle de cisaillement. [12]

$$\frac{1}{2} \text{Sup}|\sigma_1 - \sigma_{III}| \leq \tau_e \text{ ou } \text{sup}|\sigma_1 - \sigma_{III}| \leq \sigma_e \quad (6)$$

La déformation plastique commence lorsque la contrainte de cisaillement atteint une valeur critique. (Figure 1.2)

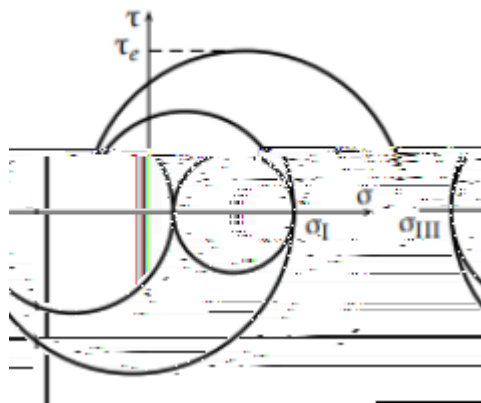


Figure 1. 2 : Critère de Tresca.

### 3.2 Critère de Von-Mises

La théorie des contraintes de Von Mises, également connue sous le nom de théorie de l'énergie de distorsion maximale, est une mesure des contraintes combinées dans un matériau, elle a été développée par Richard Von Mises en 1913, utilisée pour déterminer la contrainte maximale qu'un objet ou une structure peut supporter avant une défaillance, peu importe la complexité de l'état de stress.

Cette relation entre les énergies de cisaillement et de distorsion permet aux ingénieurs de calculer la contrainte de Von Mises d'un objet avec une plus grande précision par rapport à d'autres théories de défaillance.

Ce critère s'applique aux matériaux ductiles et met en œuvre l'énergie de distorsion. Notant qu'un état de contrainte hydrostatique change seulement le volume et non la forme des matériaux, le critère s'écrit. [12]

$$\sqrt{\frac{13}{2} \text{Tr}(\sigma \mathbf{D} \sigma \mathbf{D})} \leq \sigma_e \text{ avec } \sigma \mathbf{D}_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \text{Tr}(\sigma) \delta_{ij} \quad (7)$$

Ce critère repose sur l'hypothèse que dans un état d'élasticité, la contrainte de cisaillement maximal sur tous les points d'un milieu quelconque est la même et est égale à la moitié de la contrainte d'élasticité obtenue à partir d'un test de tension uni-axiale pour le matériau donné.

En 3D, il y a élasticité si au moins l'une des inégalités suivantes est satisfaite :

$$2|\tau_1| = |\sigma_2 - \sigma_3| \geq \sigma_y$$

$$2|\tau_2| = |\sigma_3 - \sigma_1| \geq \sigma_y$$

$$2|\tau_3| = |\sigma_1 - \sigma_2| \geq \sigma_y$$

En d'autres termes, l'élasticité repose sur la contrainte de cisaillement maximal qui est égale à la moitié de la différence entre les contraintes principales maximale et minimale. Conformément à ce critère, la contrainte principale intermédiaire n'influence pas l'état d'élasticité. [13]

## 4 Comportements mécaniques

### 4.1 Comportement fragile

Fragilité fait référence à la facilité avec laquelle un matériau se casse ou se désintègre lorsqu'il est exposé à une charge ça vous dire que ne présente pas de domaine de déformation plastique. Comme Le verre, les céramiques et les polymères. (voir la figure1.3)

La limite élastique de ces matériaux est très élevée car le déplacement des dislocations est très difficile à température ambiante. Cela est dû à la présence de liaisons covalentes et à l'alternance du signe des ions qui entraîne une modification des plans de glissement. [14]

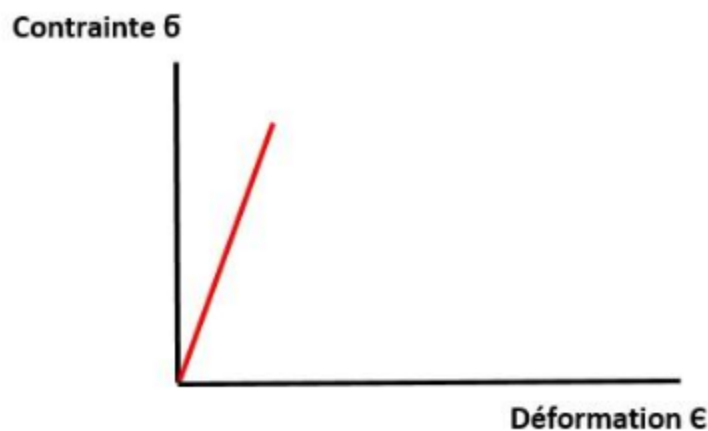
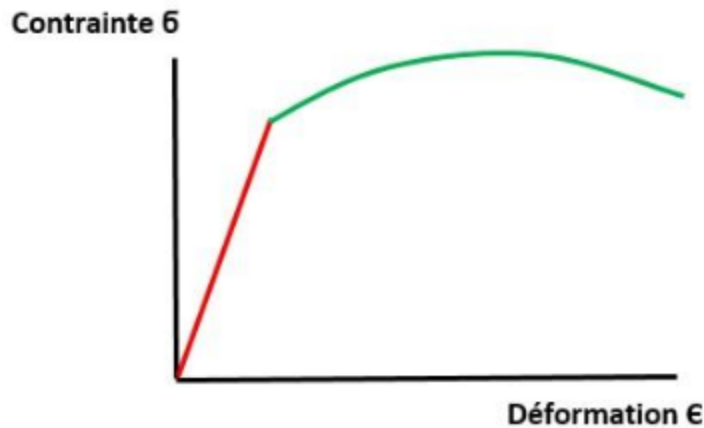


Figure 1. 3: Courbe contrainte-déformation du comportement fragile [14]

## 4.2 Comportement ductile

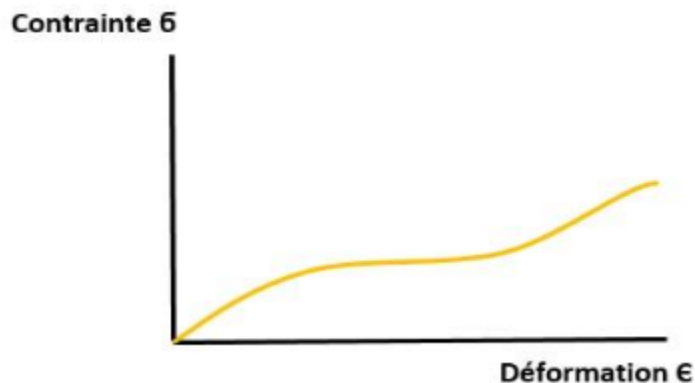
Une déformation plastique irréversible suit la déformation élastique réversible. Où La ductilité décrit la capacité d'un métal à être étiré sans rupture. La ductilité d'un matériau est généralement exprimée en pourcentage de réduction de la section transversale ou en pourcentage d'allongement. (Figure 1.4)



**Figure 1. 4 :** Courbe contrainte-déformation du comportement ductile [14]

## 4.3 Comportement non linéaire

Les matériaux élastiques non linéaires sont ceux qui n'obéissent pas à la loi de Hooke qui corrèle la charge / déplacement de manière linéaire. Ils répondent avec une élasticité pure à des quantités excessives de charge et leurs niveaux de déformation peuvent parfois dépasser 100% (parfois jusqu'à 700%) sans causer d'échec. Une autre propriété qui est importante dans la formulation de leur comportement stress-déformation est leur nature incompressible, ce qui signifie qu'indépendamment des changements de forme, le volume global reste constant. [15] (figure 1.5)



**Figure 1. 5 :** Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire [14]

---

## Chapitre 02

### Réalisation des Éprouvettes

---

## 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les techniques utilisées pour réaliser les éprouvettes de traction, sachant que leur qualité et leur représentativité influent directement sur la précision des données recueillies lors des essais ultérieurs.

## 2 Présentation du matériau utilisé

Les éprouvettes ont été découpé sur un morceau de pipeline en acier micro-allié avec du manganèse, de diamètre 8'' (pouces) équivalent à (219.18mm) et d'épaisseur de 6.4 mm

### 2.1 Métal de base

Le matériau de base utilisé est un acier allié API 5L de grade X42, dont la composition et les caractéristiques mécaniques sont donnés selon les tableaux suivants :

*Tableau 1 : Composition chimique (% pondéral) de l'acier API 5L X42*

| C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cr    | Mo    | V     | Al    | Cu    | Sn    | Ni    | Ti    |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.18 | 1.10 | 0.25 | 0.019 | 0.014 | 0.050 | 0.050 | 0.025 | 0.040 | 0.060 | 0.035 | 0.030 | 0.039 |

*Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X42*

| Type       | Module de Young | Coefficient de poisson | Limite d'élasticité (MPa) |
|------------|-----------------|------------------------|---------------------------|
| API 5L X42 | 210             | 0.3                    | 450                       |

### 2.2 Métaux d'apport

Le cordon de soudure a été réalisé avec le procédé MMA avec deux électrodes différentes ; l'une pour la passe de fond et l'autre pour les passes de remplissage. Les matériaux utilisés sont en E6010 et en E7010 de type cellulose-Na et leurs compositions chimiques et caractéristiques mécaniques sont suivant les tableaux suivants :

*Tableau 3 : Analyse chimique du métal d'apport E610 et E7010*

|              | C     | Mn        | Si     | P      | S       | Cr  | Mo  | V   |
|--------------|-------|-----------|--------|--------|---------|-----|-----|-----|
| <b>E6010</b> | ≤ 0.2 | 0.3 - 0.6 | ≤ 0.02 | ≤ 0.04 | ≤ 0.035 | 0.2 | 0.3 | .08 |
| <b>E7010</b> | 0.2   | 0.6       | 0.6    | 0.09   | 0.09    | 0.3 | 0.5 | 0.1 |

*Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques du métal d'apport E610 et E7010*

|                       | Type  | Module de Young (Gp) | Rm (MPa) | Coefficient de poisson | Limite d'élasticité Re (MPa) | A% |
|-----------------------|-------|----------------------|----------|------------------------|------------------------------|----|
| <b>Métal d'apport</b> | E6010 | 128                  | ≥ 420    | 0.34                   | 330                          | 27 |
|                       | E7010 | 128                  | 410-480  | 0.34                   | 500                          | 26 |

### 3 Procédure de soudage

L'assemblage se fait à l'électrode enrobé. Le processus comprend plusieurs étapes cruciales. La jonction est faite en 4 passes par deux types de métal d'apport (E6010 et E7010). Le tableau (Tableau 5) illustre les différents paramètres de soudage pour chaque passe. Tout d'abord, il nécessite la préparation des surfaces à assembler, incluant le chanfreinage et l'alignement des bords pour le soudage. Ensuite, il est essentiel d'éliminer tout excès d'oxydes, de rouille, de graisse ou de peinture susceptibles d'altérer la qualité de la soudure. Pour maintenir les pièces en place pendant le soudage, des pinces externes ou internes sont utilisées. En règle générale, la fixation interne est retirée une fois que le premier passage est terminé à 100%, tandis que la fixation externe est retirée une fois que 60% de l'assemblage est réalisé.

*Tableau 5 : Caractéristiques électriques du procédé du soudage*

| Passes                       | 1 <sup>ère</sup> passe | 2 <sup>ème</sup> passe | 3 <sup>ème</sup> passe | 4 <sup>ème</sup> passe |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Procédé de soudage           | SMAW                   | SMAW                   | SMAW                   | SMAW                   |
| Position de soudage          | 5G ↗                   | 5G ↖                   | 5G ↙                   | 5G ↘                   |
| Rotation fixe                | Fixe                   | Fixe                   | Fixe                   | Fixe                   |
| Courant/Polarité             | DC-EN                  | DC-EP                  | DC-EP                  | DC-EP                  |
| Métal d'apport               | E6010                  | E7010                  | E7010                  | E7010                  |
| Diamètre de l'électrode (mm) | 3.25                   | 3.25                   | 4.00-4.8               | 4.00-4.8               |
| Intensité de courant         | 80-135                 | 90-140                 | 110-150                | 110-150                |
| Tension                      | 30-35                  | 25-35                  | 30-40                  | 30-40                  |

Le soudage du pipeline représenté dans la figure suivante s'est fait au niveau d'Entreprise de soudage des tubes CANA GAZ



**Figure 2. 1:** Morceau de pipeline soudé

La figure suivante représente la géométrie de la section du joint du pipeline

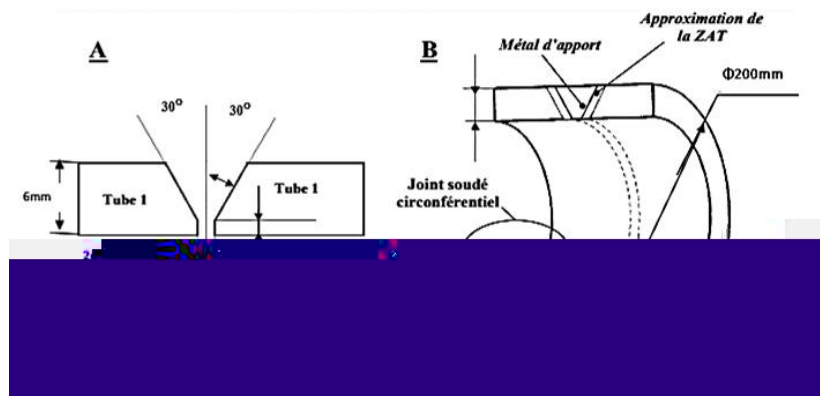


Figure 2. 2 : Géométrie de la section du joint soudé du pipeline

## 4 Étapes de réalisation des éprouvettes

Les brutes des éprouvettes ont été obtenues à partir du pipeline soudé. Nous avons utilisé une faiseuse universelle dans l'atelier de fabrication, la faculté de de technologie Chetouane. La réalisation des éprouvettes est faite par des différentes étapes :

### 4.1 Découpage des éprouvettes

Pour le découpage de l'éprouvette, on utilise une fraiseuse universelle WEYRAUCH FR-U-1100, représentée sur la figure2.3 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Dimension de la table : longueur 1000mm largeur 250mm
- Déplacement longitudinal : manuel 740mm automatique 710mm
- Déplacement vertical : manuel 380mm automatique 360mm
- Déplacement transversale : manuel 260mm automatique 230mm
- Nez de la broche morse : SA 40
- Gamme de vitesse de la broche : 45 – 2000 tr/mn
- Poids de la machine 1900kg
- Puissance moteur broche 3KW
- Puissance moteur des avances 1.1 KW
- Nombre des avances 18
- Gamme des avances 6.3 – 315 mm/mn
- Encombrement de la machine : 2700x1950 x1550. [16]



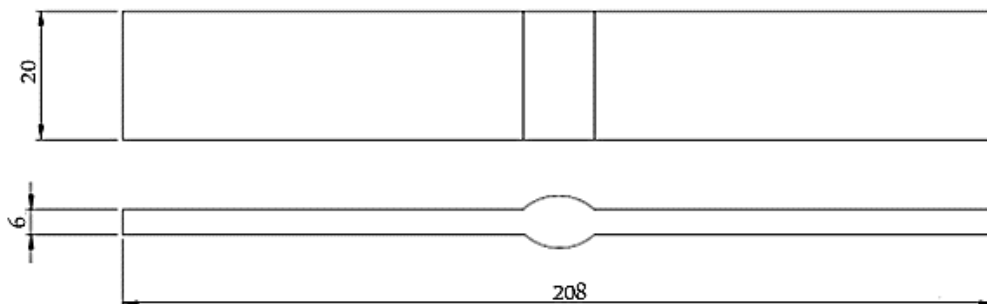
**Figure 2. 3 :** Fraiseuse universelle WEYRAUCH FR-U-1100

A partir du pipeline soudé, on découpe les brutes des éprouvettes (voir figure 2.4)



**Figure 2. 4 :** Découpage des éprouvettes brutes

La figure 2.5 et la figure 2.6 suivantes représentent l'éprouvette brute



**Figure 2. 5 :** Designs des éprouvettes brutes.



**Figure 2. 6 :** Photo de l'éprouvettes brutes.

## 4.2 Usinage des éprouvettes

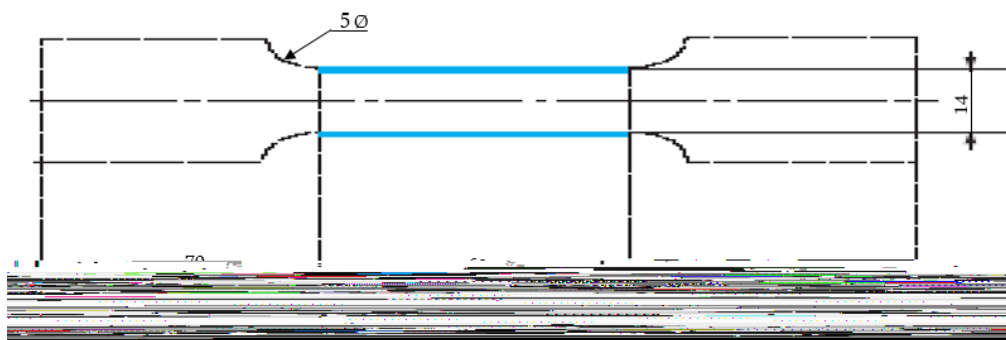
Les éprouvettes ont été réalisées sur la fraiseuse universelle pour obtenir une forme normalisée. Ou on fixe les dimensions réelles des éprouvettes.

La photo de la figure 2.7 suivante représente le déroulement de l'usinage



**Figure 2. 7 :** Photo usinage des éprouvettes

La forme de l'éprouvette obtenue est selon le dessin de la figure 2.8



**Figure 2. 8:** Designs de l'éprouvette finie

La figure 2.9 suivante est une photo des trois éprouvettes réalisées



**Figure 2. 9** : Photo des éprouvettes finaux

## 5 Conclusion

La réalisation des éprouvettes décrite dans ce chapitre nécessite une compréhension approfondie des matériaux utilisés, des procédures de soudage et des techniques d'usinage. Chaque étape, du découpage initial à l'usinage final, est cruciale pour garantir la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. À travers ces processus méticuleux, notre objectif est d'évaluer de manière précise les propriétés mécaniques et les performances des matériaux soumis aux tests.

---

Chapitre 03 :

Partie expérimentale

---

## Introduction

Les essais mécaniques sur les assemblages soudés ont pour but de comparer les caractéristiques mécaniques à celles du métal de base, tout en respectant une ou plusieurs normes exigées. Dans cette étude, la norme utilisée est la norme américaine API (American pétroleur institut).

### 1 La machine de traction

La partie des essais de traction ont été effectués dans le laboratoire de matériaux de construction du département de génie mécanique de la faculté de technologie Chetouane. Des essais de traction à l'aide d'une machine hydraulique universelle de type CONTROLAB modèle H0003. La machine, contrôlée par un ordinateur avec logiciel, enregistre les courbes de force / déformation et est connectée à une chaîne d'acquisition pour l'enregistrement des contraintes et de l'allongement. Elle dispose d'une tête de serrage inférieure mobile et d'un capteur d'effort a juges de 600 kN, avec une vitesse de mouvement de 30mm / min.



Figure 3. 1: Machine de traction 600 KN

## 2 Protocole

Nous avons commencé par paramétrer la machine à l'aide de l'ordinateur connecté à celle-ci. Nous avons introduit plusieurs paramètres, tels que la vitesse de sollicitation et les dimensions de l'éprouvette (on a mesurer à nouveau l'éprouvette, en notant sa longueur utile initiale ( $L_0$ ), sa longueur ( $L_c$ ) et sa largeur),

Ensuite, nous avons placé l'éprouvette entre les deux mors plats de la machine sur la partie utile de l'éprouvette (longueur de 60 mm) et appliqué un léger serrage manuel pour maintenir la pièce en place. Ensuite, nous avons défini la vitesse d'essai (2 mm/min). Après cela, Nous avons ensuite commencé les essais, en testant une éprouvette après l'autre. (Figure 3.2)



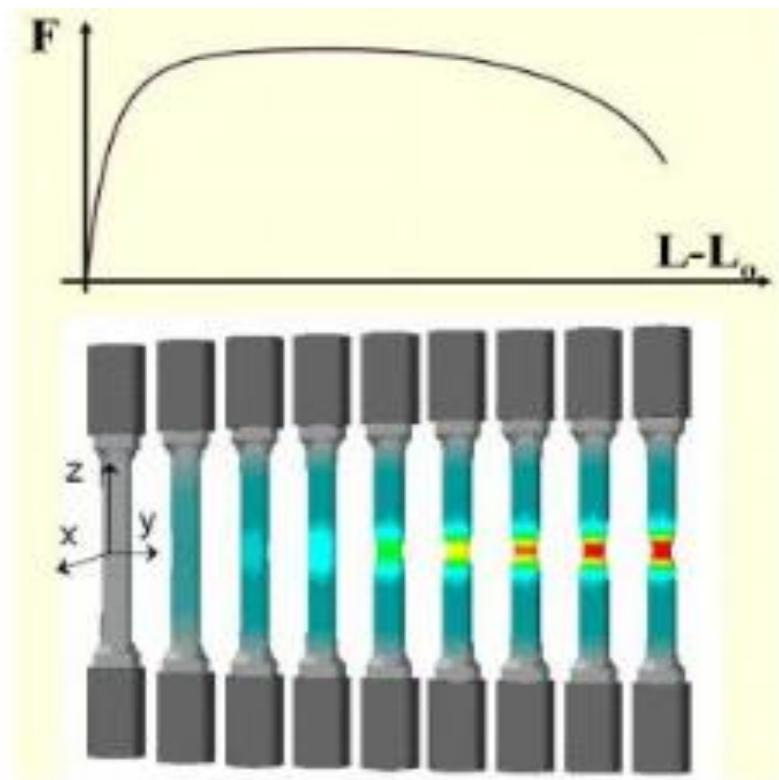
**Figure 3. 2 :** Epreuve de traction avant la rupture dans la machine de traction

Sur l'écran d'ordinateur on a pu voir l'évolution de la déformation en fonction de la force en temps réel jusqu'à la rupture (Figure 3.3).



**Figure 3. 3 :** Logiciel pilote de la machine de traction

Pendant l'essai de traction, l'éprouvette subit plusieurs phénomènes, qui sont représentés sur la figure suivante :



**Figure 3. 4** : Etapes d'évolution de l'éprouvette durant la traction. [15]



**Figure 3. 5** : Photos des éprouvettes soudées après la rupture

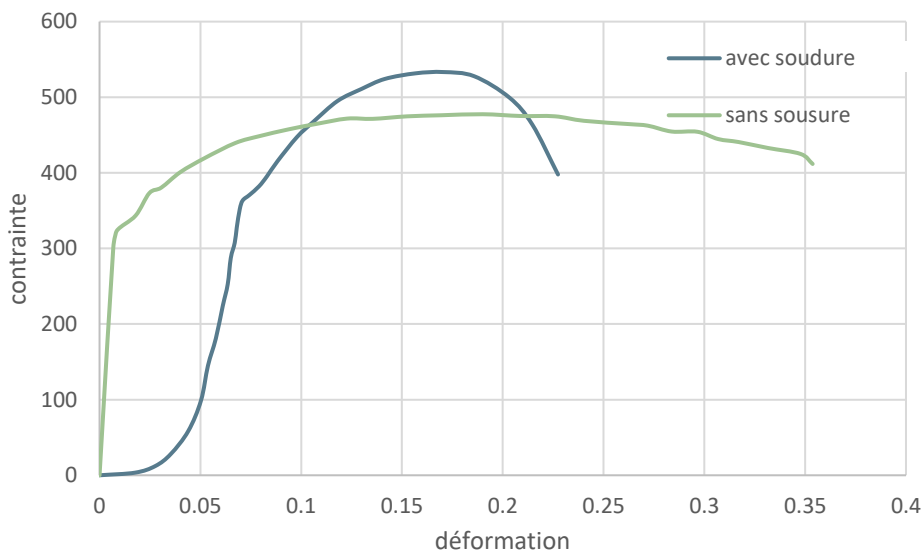


montrant une croissance initiale plus lente mais atteignant finalement un plateau similaire à celui de "ép 1".

Les résultats des essais de traction montrent que des soudures bien exécutées augmentent considérablement la capacité de résistance d'un pipeline. Les échantillons avec soudure peuvent résister à des contraintes plus élevées avant de se déformer et de se casser. Les fractures sont souvent situées près du joint de soudure en raison des concentrations de contrainte.

#### 4 Les courbes de contrainte déformation

Après avoir calculer les déformations relatives et tracer les courbes (contrainte en fonction des déformations), nous avons obtenu les courbes sur le graphe suivant de la figure 3.7.



**Figure 3. 7** : Courbes contrainte-déformation des éprouvettes soudée et non soudée

##### 4.1 Interprétation

###### Avec soudure :

- La courbe montre une augmentation rapide de la contrainte jusqu'à environ 0,05 de déformation, atteignant une contrainte maximale d'environ 550 MPa.

- Après ce pic, la contrainte diminue progressivement avec l'augmentation de la déformation, indiquant un phénomène de plasticité suivie d'une rupture.

- La courbe montre une résistance maximale plus élevée mais une ductilité réduite. La présence de la soudure peut introduire des contraintes résiduelles et des points de concentration de contraintes, ce qui pourrait expliquer la montée rapide en contrainte et la chute abrupte après le pic.

### Sans soudure :

- La courbe montre une augmentation plus graduelle de la contrainte, atteignant un plateau autour de 450 MPa de contrainte à environ 0,15 de déformation.

- La contrainte reste relativement stable au-delà de ce point, avec une légère diminution au fur et à mesure que la déformation augmente, suggérant une meilleure ductilité par rapport à la condition avec soudure.

- La courbe indique un comportement plus ductile avec une contrainte qui atteint un plateau sans une diminution rapide. Cela suggère une meilleure distribution des contraintes et une absence de défauts introduits par la soudure.

## **5 Conclusion**

Les différences significatives observées entre les courbes de déformation-contrainte des échantillons "avec soudure" et "sans soudure" peuvent être expliquées par plusieurs facteurs. Le processus de soudage introduit des contraintes résiduelles et modifie la microstructure du matériau dans la zone affectée par la chaleur (ZAT). Ces modifications peuvent inclure la formation de phases plus fragiles ou de grains grossis, augmentant la contrainte maximale mais réduisant la ductilité. De plus, le soudage peut introduire des défauts tels que des inclusions, des porosités ou des microfissures, qui agissent comme des points de concentration de contraintes, augmentant la probabilité de rupture précoce. En revanche, les échantillons sans soudure conservent une microstructure homogène et intacte, assurant une répartition uniforme des contraintes et une meilleure capacité de déformation sans rupture. L'absence de ZAT et de défauts introduits par le soudage favorise une intégrité structurelle supérieure et des propriétés mécaniques plus équilibrées.

---

Chapitre 0 4 :

Simulation

---

## Introduction

En tant qu'outil de simulation, il peut non seulement résoudre de nombreux problèmes structurels, mais également simuler de nombreux autres processus d'ingénierie.

Avant de simuler les essais de traction ci-dessus, on peut aussi générer le modèle géométrique par ses logiciels de dessin comme CATIA ou SOLIDWORKS ensuite importer dans ABAQUS.

La courbe de contraintes et de déformations est utilisée comme les informations d'entrée de ce matériau. Dans cette étude, le module de Young de l'acier API X42 est de 210000 MPa et le coefficient de poisson est de 0,3.

L'idée principale de cette simulation est d'obtenir la force de déplacement de traction du matériau par entrer la courbe de contrainte et déformation comme condition d'entrer, puis comparer la courbe de simulation avec celle de test expérimental pour une discussion sur la précision de la simulation

## 1 Définition d'ABAQUS

Abaqus est un logiciel de calcul d'éléments finis développé par ABAQUS, Inc (Dassault Systèmes). Il se compose de trois produits principaux :

- **ABAQUS/Standard** : Un solveur généraliste qui utilise un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- **ABAQUS/Explicit** : Un solveur pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires en utilisant un schéma d'intégration explicite.
- **ABAQUS/CAE** : Une interface graphique intégrée pour la visualisation et la modélisation des modèles d'éléments finis. [18]

La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité.

Ce logiciel est largement utilisé dans les industries automobiles, aéronautiques et universitaires pour la recherche et l'éducation ou Elle offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples. [19]

## 2 Méthodologie de modélisation statique

Vue au développement rapide de la science des matériaux, divers types de matériaux métalliques ont émergé. Les caractéristiques de déformation et de contrainte des matériaux sont des conditions préalables à leur application dans la production réelle. Cela nécessite donc de nombreuses expériences qui coûteront beaucoup de main d'œuvre, de matériaux, temps et équipements pour obtenir les caractéristiques.

Dans notre étude, nous simulons le processus de pipe en essai de traction quasi-statique basé sur le code d'élément ABAQUS pour discuter de la précision des données de simulation avec celles de résultats expérimentaux.

On modélise l'éprouvette de traction dont ses dimensions sont celles utilisées dans le test sur la machine.

Concernant les propriétés mécaniques élastiques on a le module de Young  $E=210000$  MPa et le coefficient de poisson  $\nu=0.3$ , tant que les propriétés plastiques ont été introduites les contraintes réelles  $\sigma_{true}$  et le déplacement plastique  $\epsilon_{pl}$  calculés suite aux équations ci-dessus :

$$\sigma = \frac{F(N)}{A_0(m^2)} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (9)$$

$$\sigma_{true} = \sigma * (1 + \epsilon) \quad (10)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon) \quad (11)$$

$$\epsilon_{plastique} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (12)$$

### 2.1 Module PART

- Double clic sur *Part*
- Dans la boîte de dialogue *Create Part* : renommer la pièce éprouvette.
- Sélectionner *3D/déformable/Solid/Extrusion* : choisir approximative size=200 continue

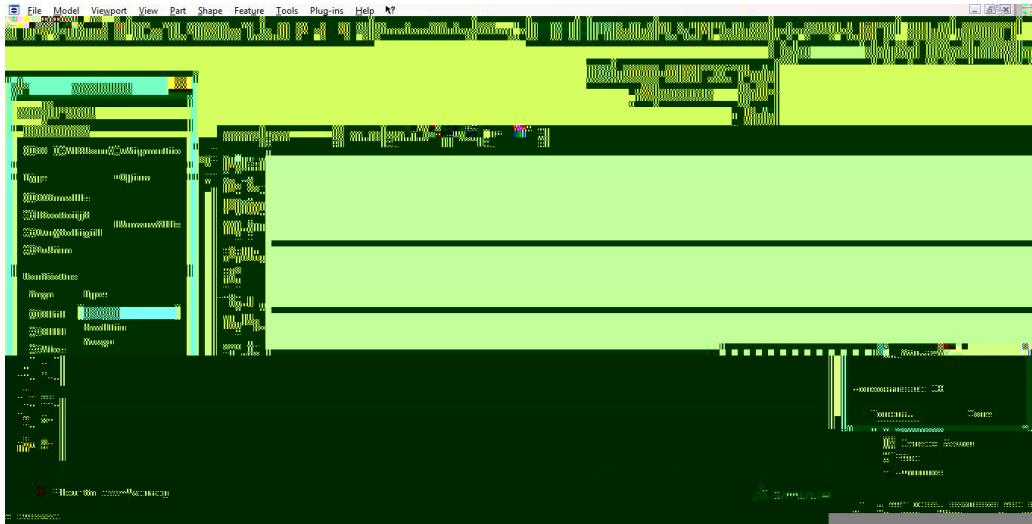


Figure 4. 1: Module PART

## Créer la géométrie de l'éprouvette

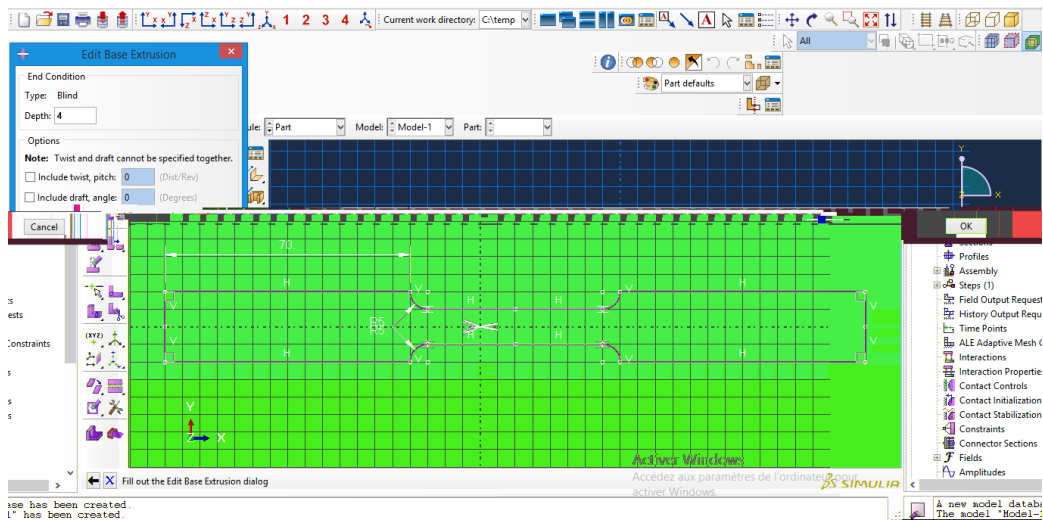


Figure 4. 2 : Création de la géométrie de l'éprouvette

- Cliquer **Done**
- Cliquer sur l'onglet **Partition Cella** : Extrude/Sweep Edges
- Choisir une arête dans le même plan d'extrusion et cliquer sur **Done**.
- Cliquer sur la case **Extrude Along Direction**
- Choisir une arête confondue avec la direction de projection
- Cliquer **OK** puis **Create Partition** et **Done**

**Figure 4. 3:** Partition Cella

**2.2 Module PROPRETY**

au.9/acier0.000087clio 595.32 841.92 reW\*nBT/F7 12.96 Tf1 0 0 1 200.n80Qq0.0265.49c[54.6Qq0.000

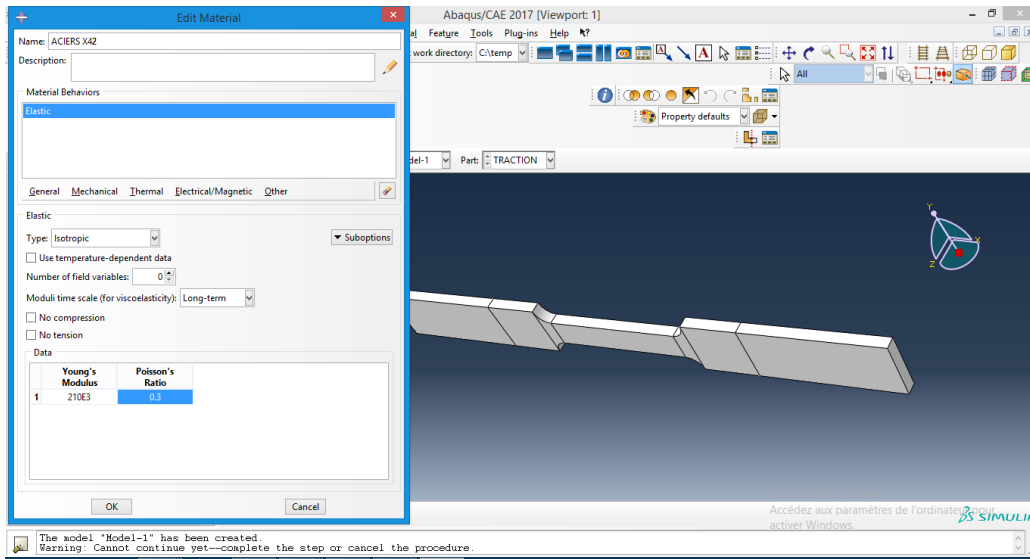


Figure 4. 5 : Insérer les propriétés élastiques

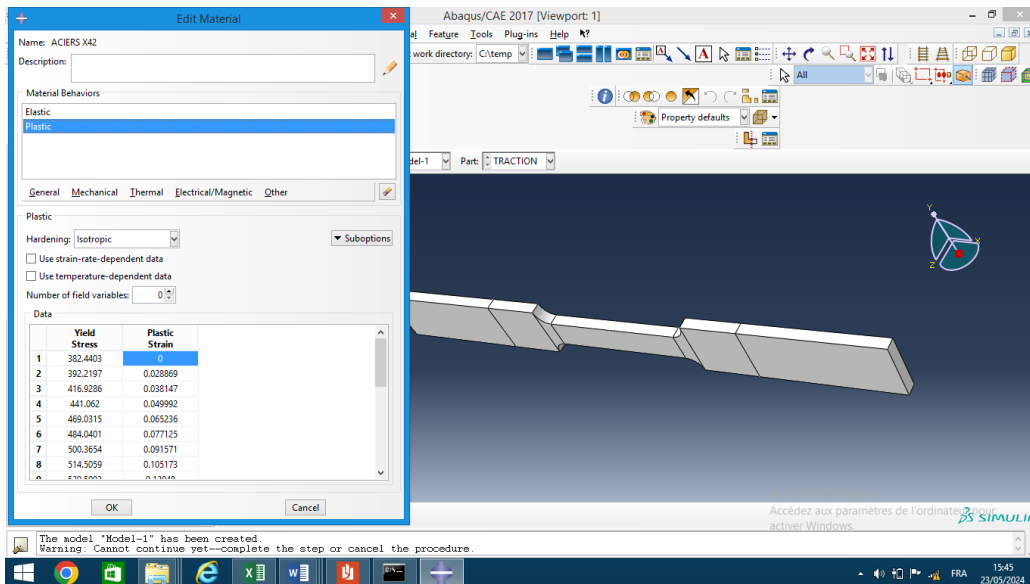
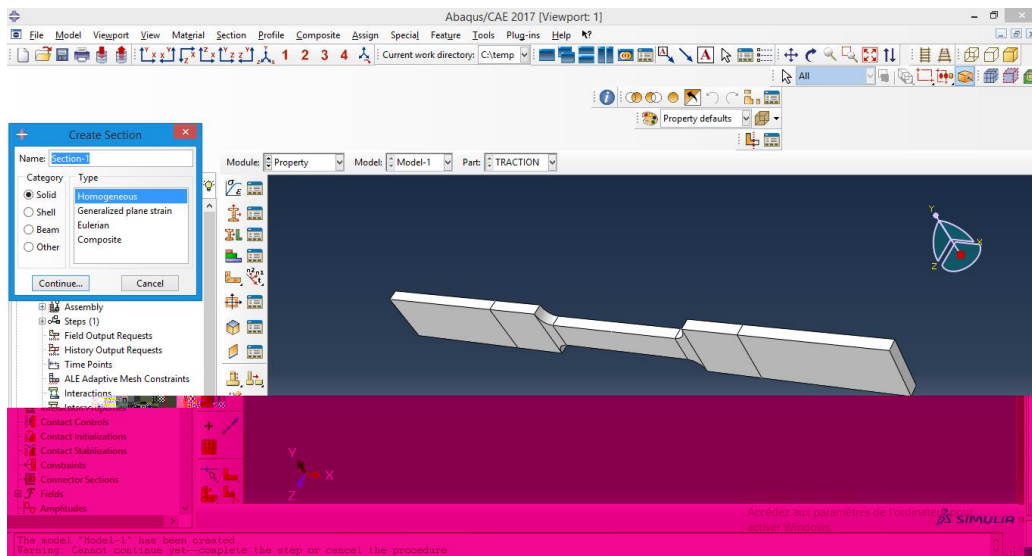
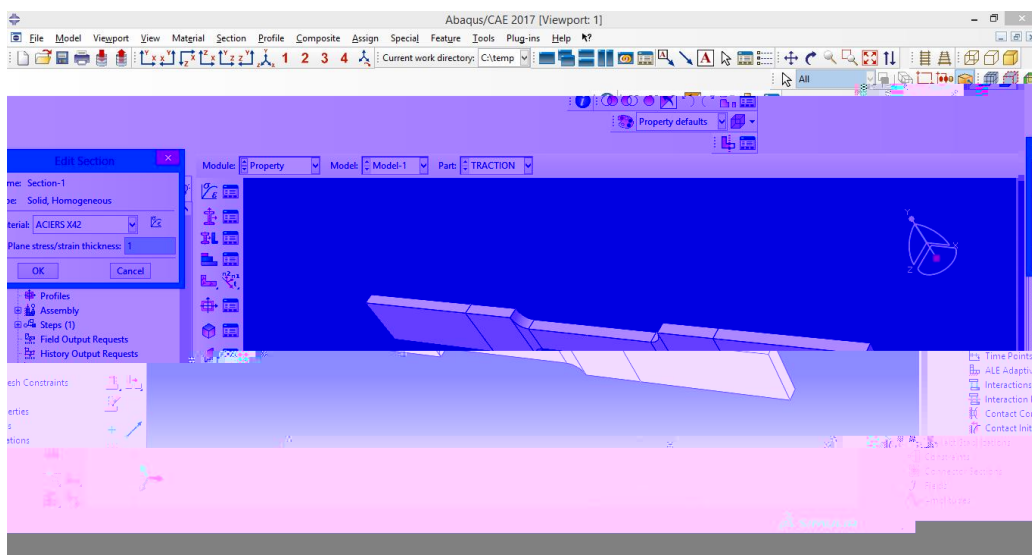


Figure 4. 6 : Insérer les propriétés plastic



**Figure 4. 7 : Création d'une section**



**Figure 4. 8 : Modification d'une section**

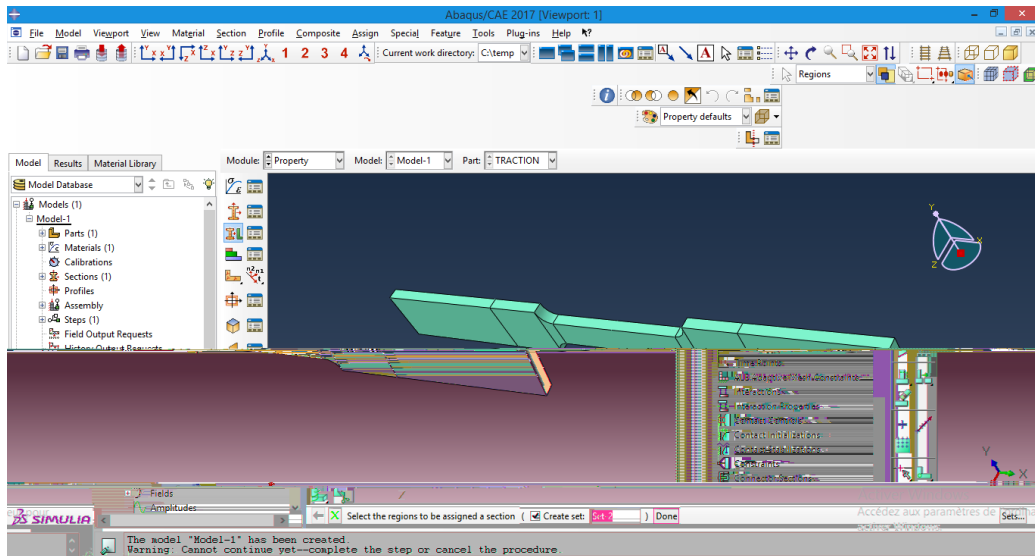


Figure 4. 9 : Application des propriétés sur l'éprouvette

### 2.3 Module assembly

Dans l'arbre modèle développer, élargissez la catégorie "*Assembly*". Effectuez un double-clic sur "*Instances*" dans la liste affichée. Dans la fenêtre de dialogue "*Create Instance*", choisissez "*Poutre\_3D*" dans la liste déroulante, puis cliquez sur "*OK*".

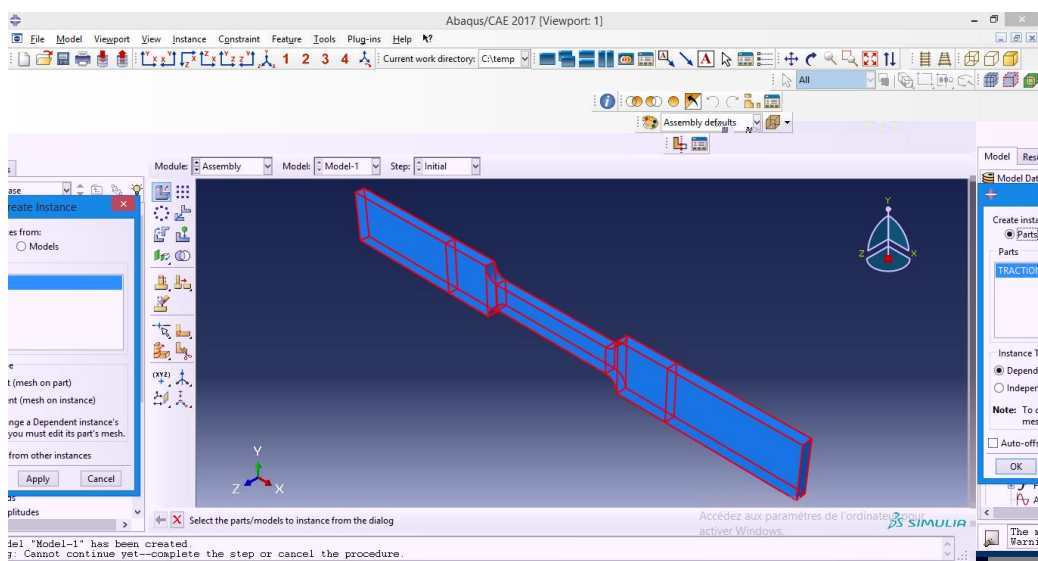


Figure 4. 10 : Module ASSEMBLY

### 2.4 Module Step

Le module *STEP* offre la possibilité d'effectuer différentes étapes de calcul. Selon les besoins, une analyse peut inclure une ou plusieurs étapes (Steps). Par exemple, dans le cas d'une analyse statique, on peut choisir un mode "*Static, General*". Ou bien *Dynamic explicit* dans le cas d'études de crash ou d'impact. (Voir Figure 4. 11)

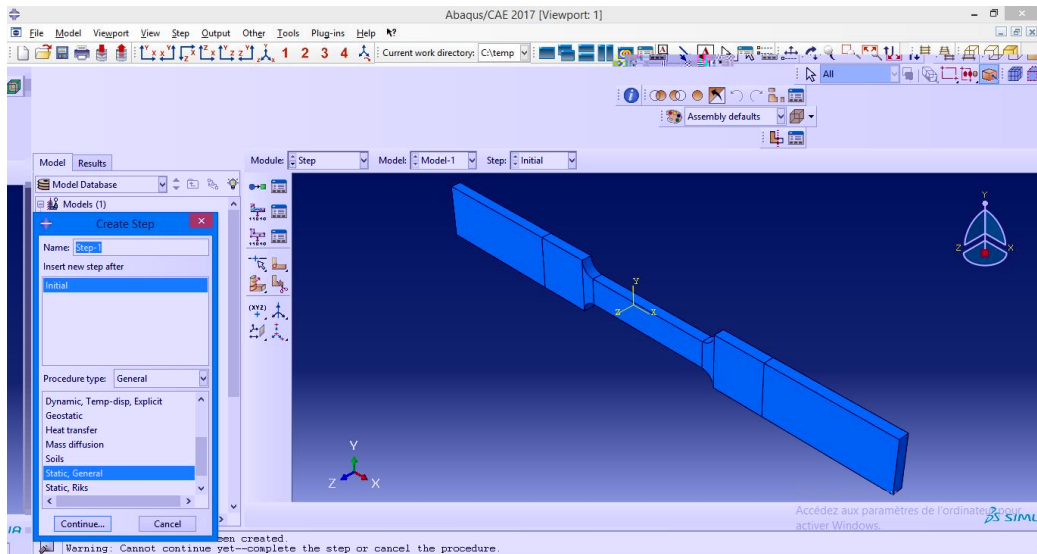


Figure 4. 11 : Module STEP

## 2.5 Module Load

Le module permet de spécifier les contraintes subies par la pièce ou le système analysé. On y définit le type d'effort appliqué, qu'il s'agisse de chargements mécaniques, thermiques ou autres. Ce module permet de préciser tous les chargements et conditions limites du problème étudié. Ces chargements et conditions limites sont associés aux étapes (*Steps*) de l'analyse ; par exemple, une force appliquée au *Step 1* peut être inactive au *Step 2* (la Figure 4.12)

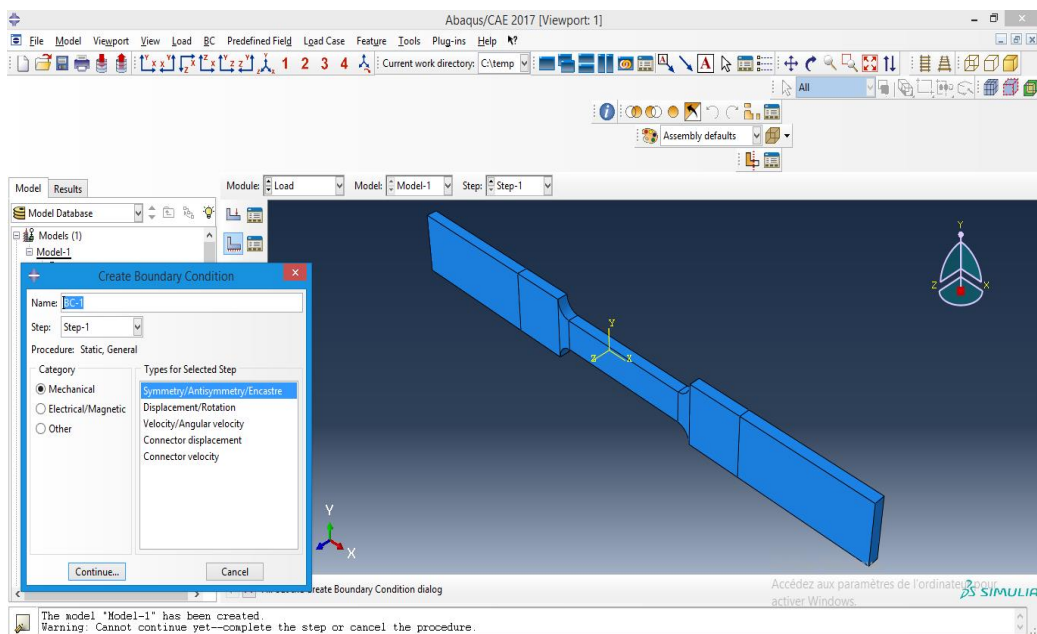


Figure 4. 12 : Module LOAD

### 2.5.1 Application des conditions aux limites à l'éprouvette

Dans la liste des étapes (*Steps*), sélectionnez *Initial*. Dans la liste des catégories (*Category*), acceptez *Mechanical* comme catégorie par défaut. Dans la liste des types pour l'étape sélectionnée (*Types for Selected Step*), sélectionnez *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* et cliquez sur *Continue*. Dans le *Viewport*, sélectionnez-la face à encasturer et cliquez sur *Done*. La boîte de dialogue *Edit Boundary Condition* s'affiche (Figure 4.13). Cochez la case *Encastre* et cliquez sur *OK*.

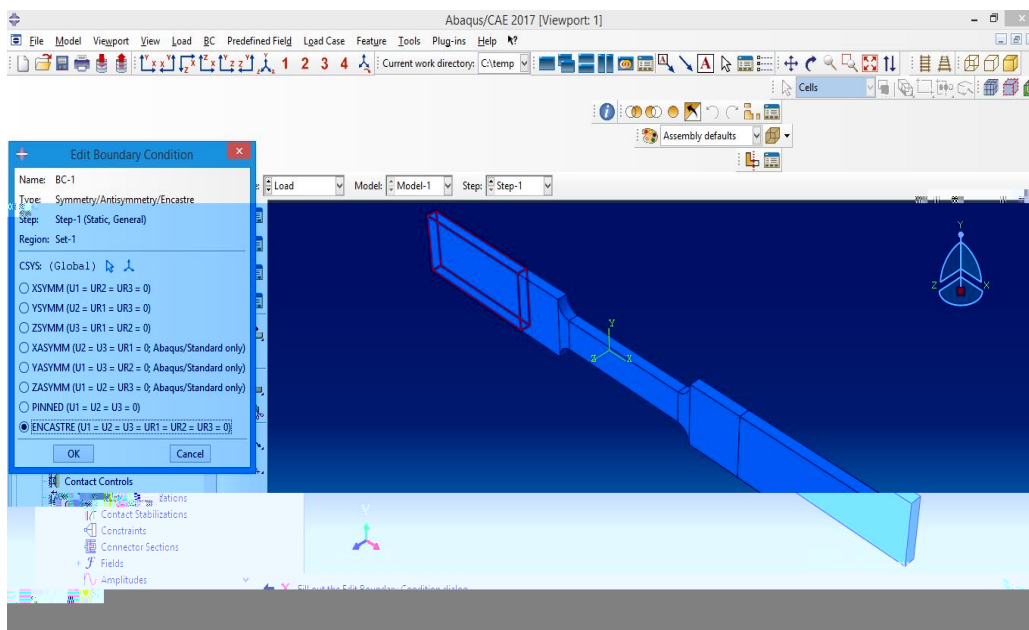


Figure 4. 13 : Application des conditions aux limites à l'éprouvette

### 2.5.2 Application du chargement sur l'éprouvette

- Cliquez sur *Create Load*. La fenêtre *Edit Load* apparaît.
- Dans la liste *Category*, acceptez *Mechanical* comme catégorie.
- Dans la liste *Types for Selected Step*, sélectionnez *Pressure* et cliquez sur *Continue*.
- Dans le *Viewport*, sélectionnez la face supérieure et cliquez sur *Done*.
- La boîte de dialogue *Edit Load* s'affiche (Figure 4.14).
- Remplissez le champ *Magnitude* avec la valeur *100* et cliquez sur *OK*

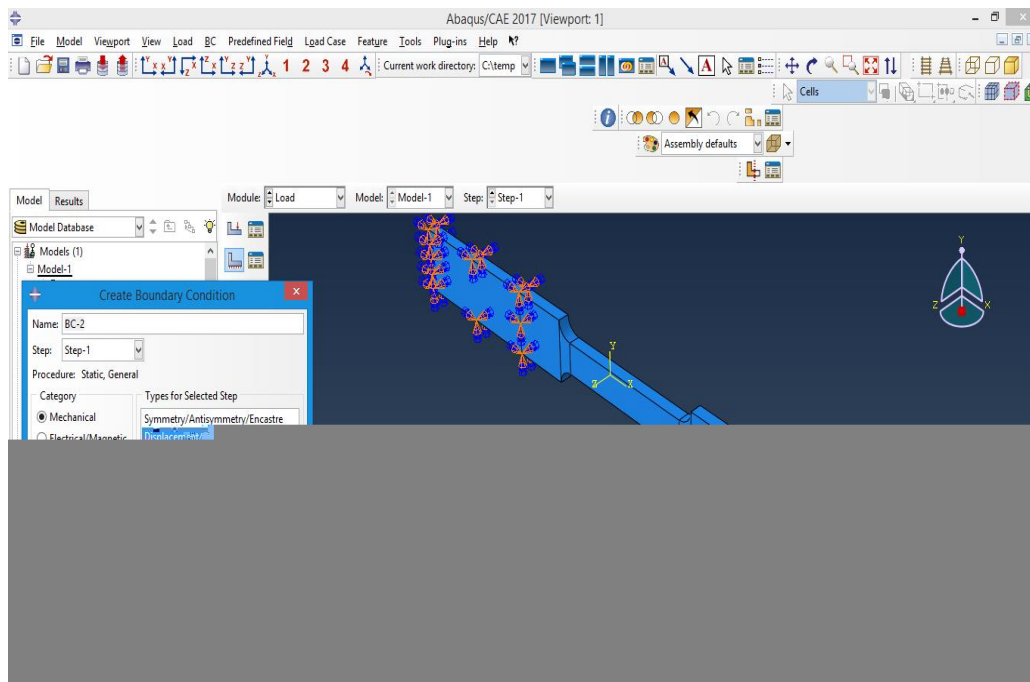


Figure 4. 14 : Application du chargement sur la poutre

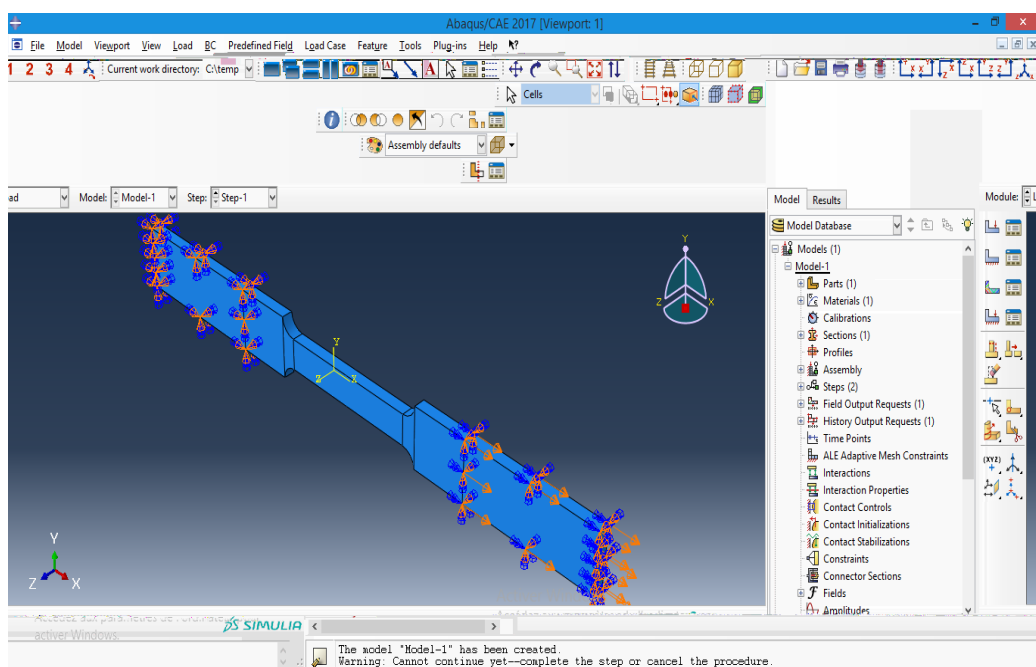


Figure 4. 15 : Après l'application des forces

## 2.6 Maillage

Le module MESH permet de créer le maillage de la pièce. Il contient tous les outils nécessaires pour générer le maillage élément fini sur un assemblage. Plus ce maillage est resserré, plus la solution obtenue par la méthode des éléments finis sera précise.

- Démarche Dans le module **MESH** cliquer sur **Mesh**.
- Dans la barre de menu, cliqué sur **Part**, la poutre est coloriée en vert.
- Cliquer sur **Seed Part**,

La fenêtre **Sizing Controls** apparait,

- Choisir **Approximate** et cliquer sur **apply** puis **OK**.
- A la fin cliquer sur **Mesh/Pat**
- Confirmer le maillage en cliquant sur **Yes** en bas du **Viewport** (Figure 4.16)

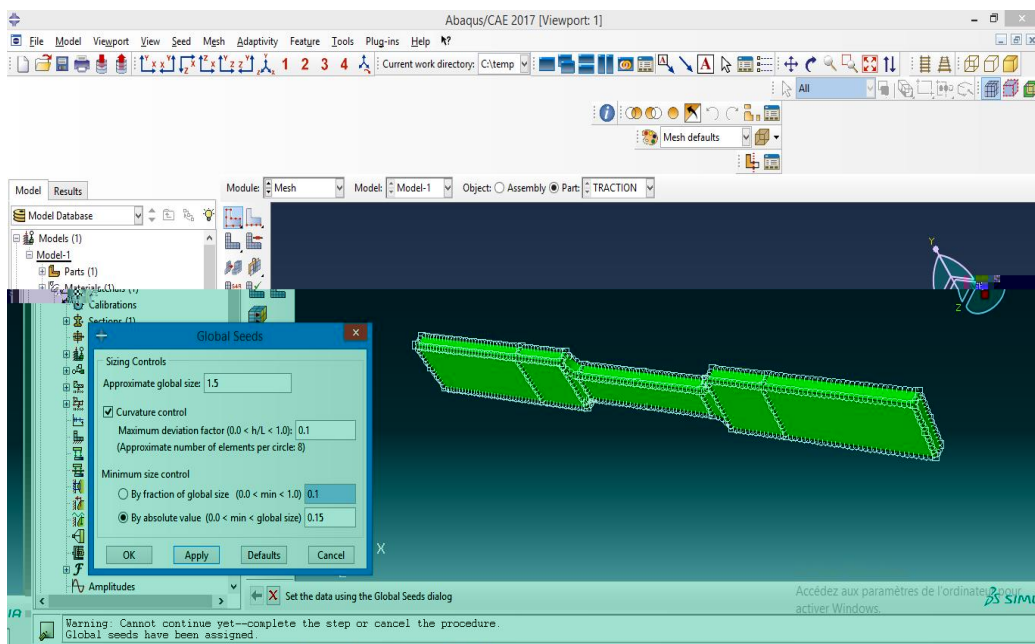


Figure 4. 16 : Maillage

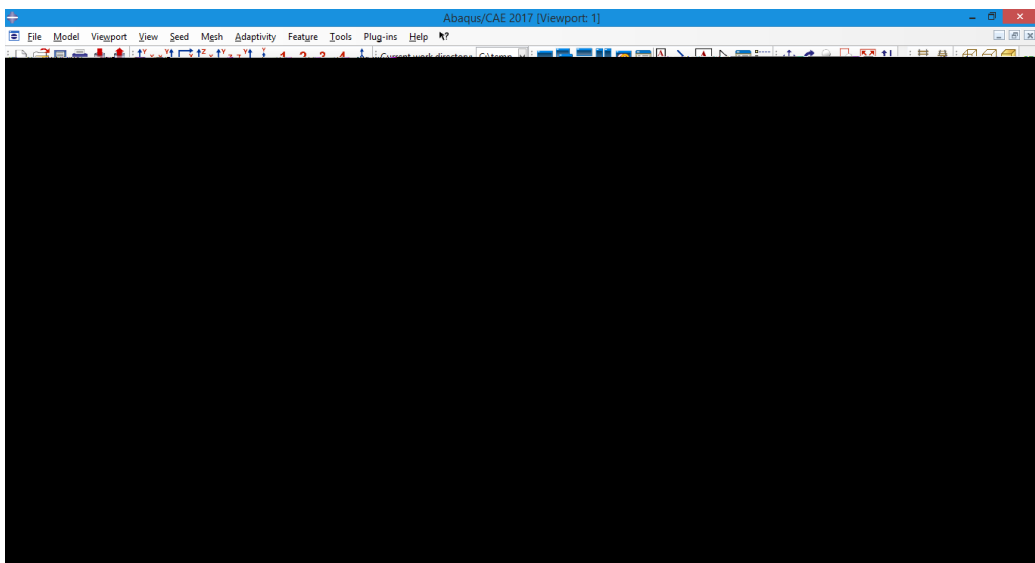


Figure 4. 17 : Après l'application de maillage

## 2.7 Module JOB

Le module **JOB** permet de lancer le calcul. Les contraintes, les déformations et les déplacements de notre pièce ou système étudié sont ainsi calculés.

- Création du **Job** :
- Double-clic sur **Jobs** pour ouvrir la boîte de dialogue **Create Job**.
- Créez un nouveau travail (Figure 4.17) et cliquez sur **OK**.
- Pour soumettre le travail, cliquez sur **Submit**.
- À la fin de l'analyse, en bas du **Viewport**, ABAQUS affiche **Completed Successfully**.
- Pour visualiser les résultats, cliquez sur **Results**

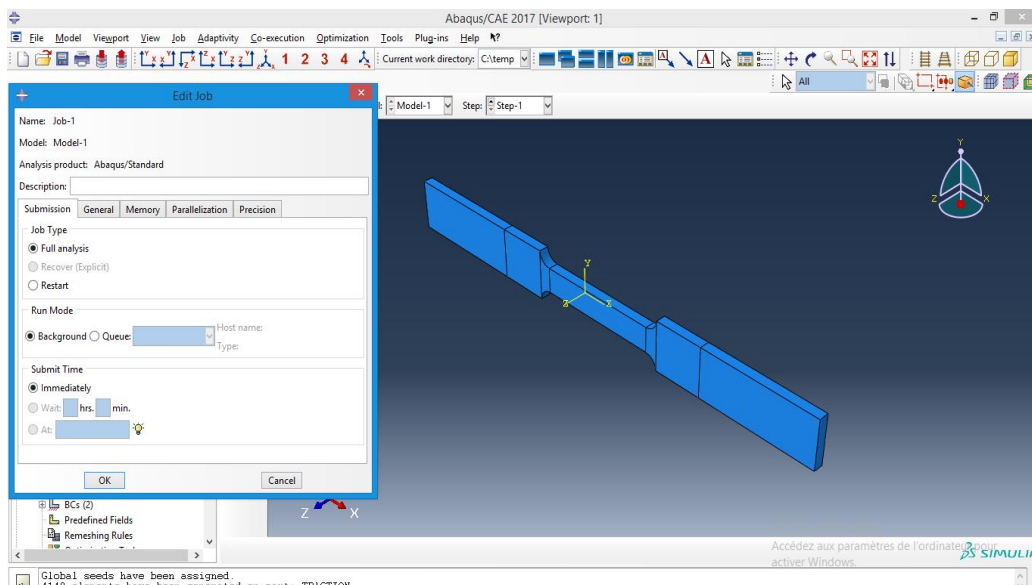


Figure 4. 17 : Module JOB

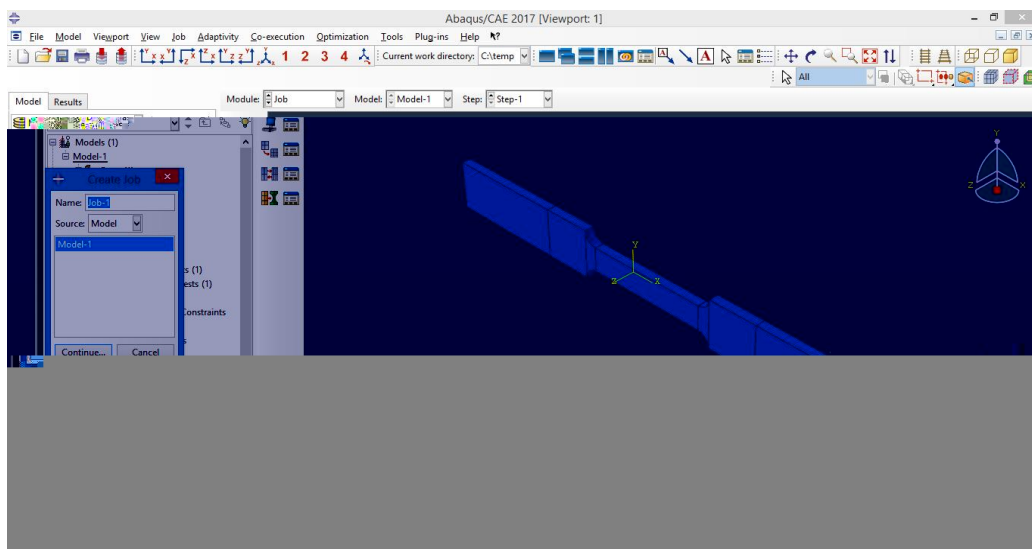


Figure 4. 18 : Création de JOB

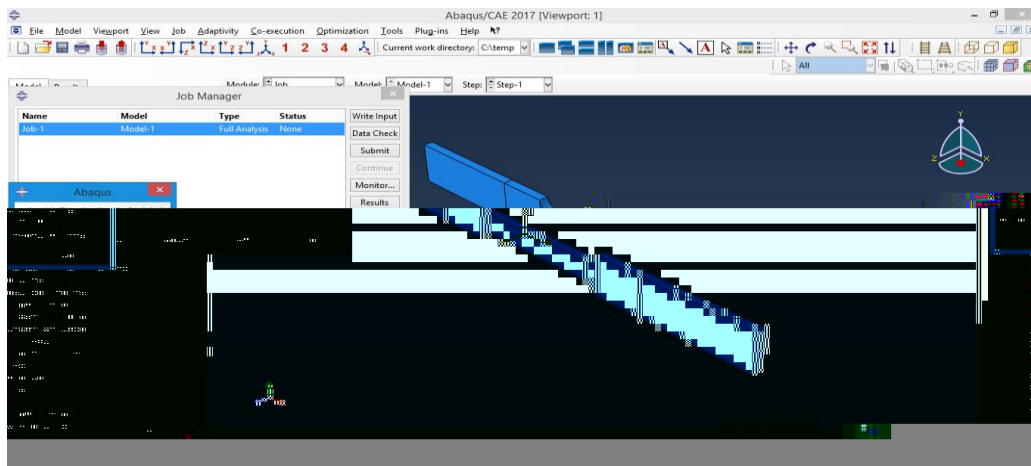


Figure 4. 19 : Manager de JOB

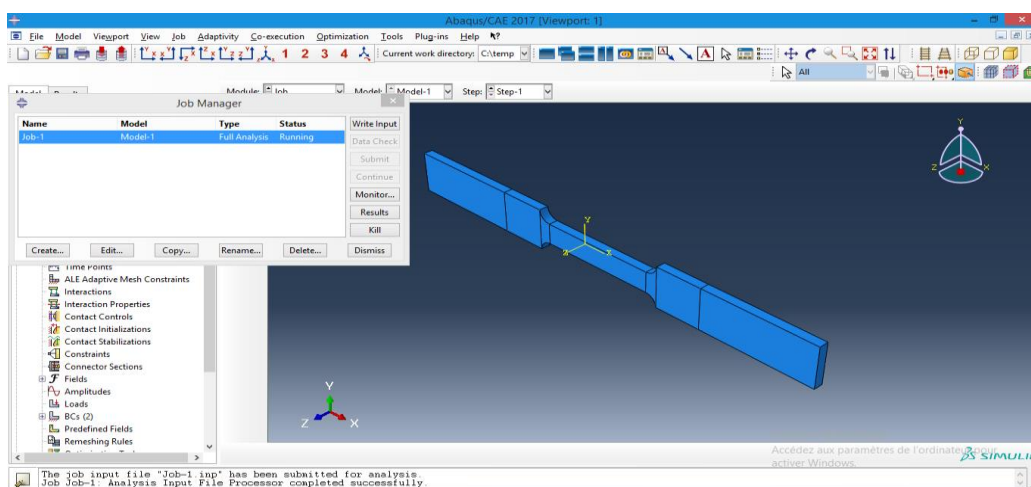


Figure 4. 20 : Application de JOB

## 2.8 Module Visualisation

Le module *VISUALISATION* permet de visualiser les résultats des calculs lancés précédemment (Figure 4.21)

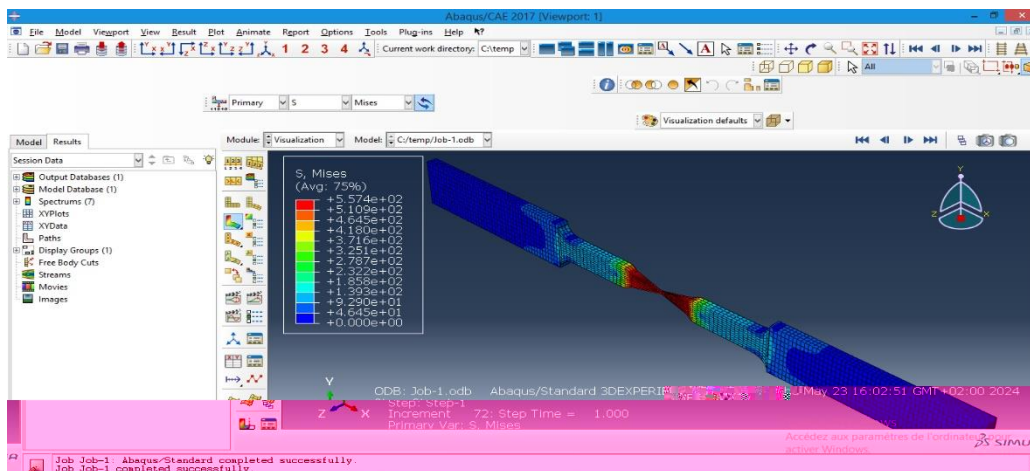
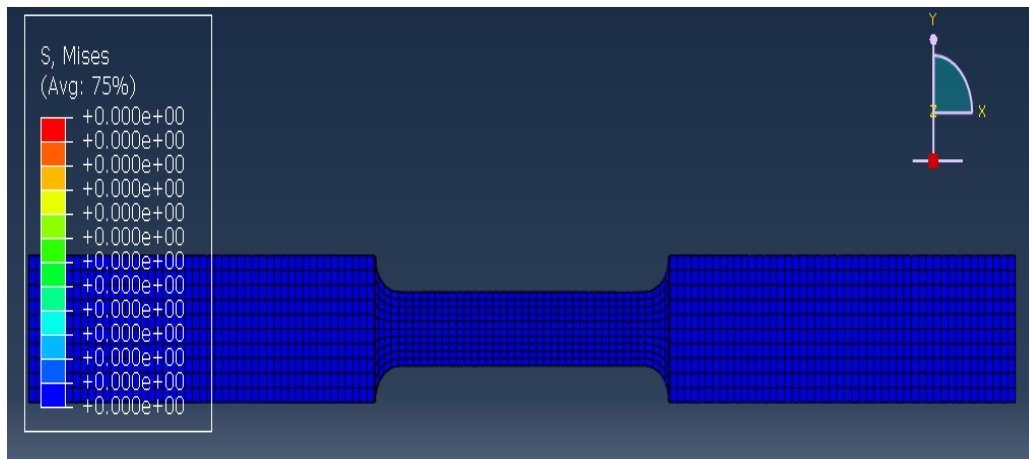


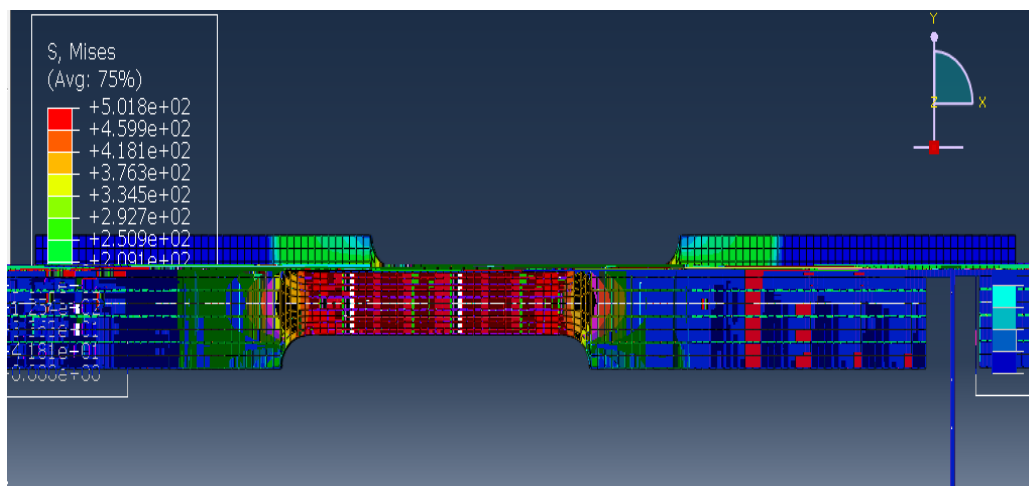
Figure 4. 21 : Module Visualisation

**2.8.1 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 0$**



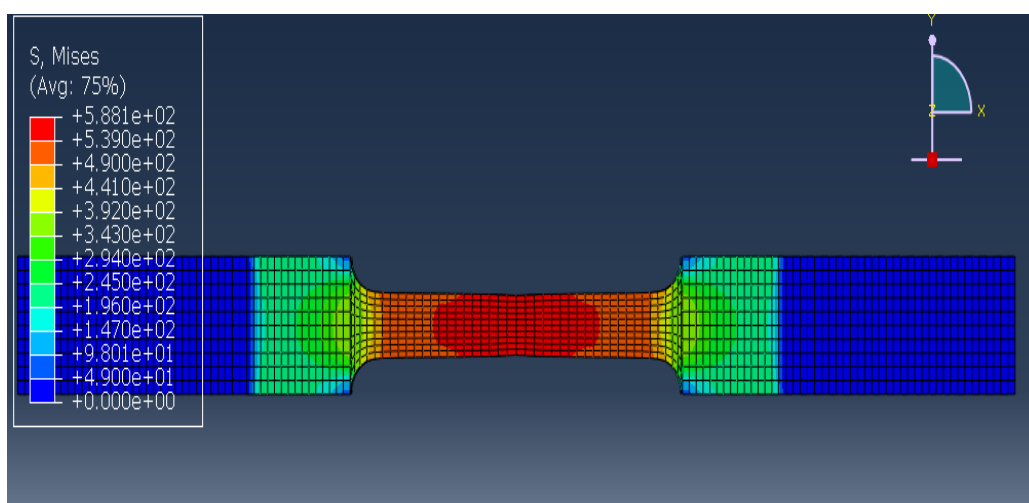
**Figure 4. 22 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 0$

**2.8.2 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 5$**



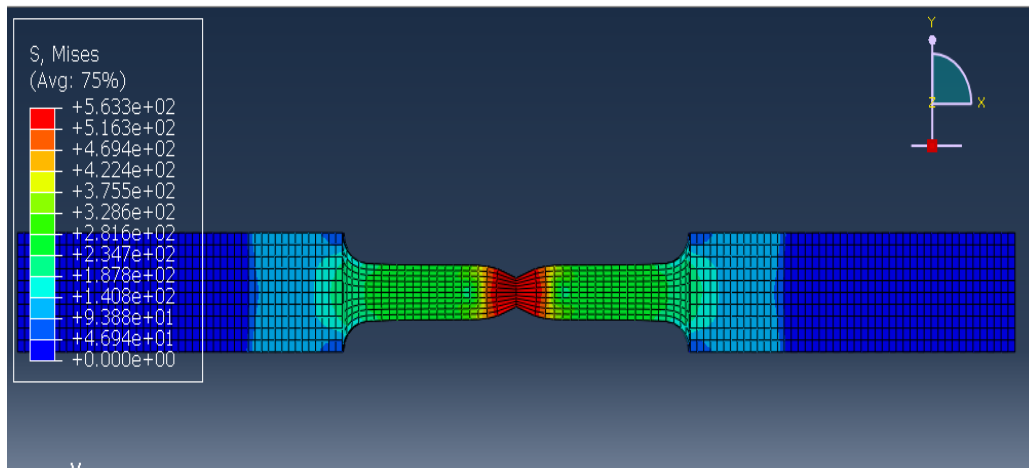
**Figure 4. 23 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 05$

**2.8.3 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 10$**



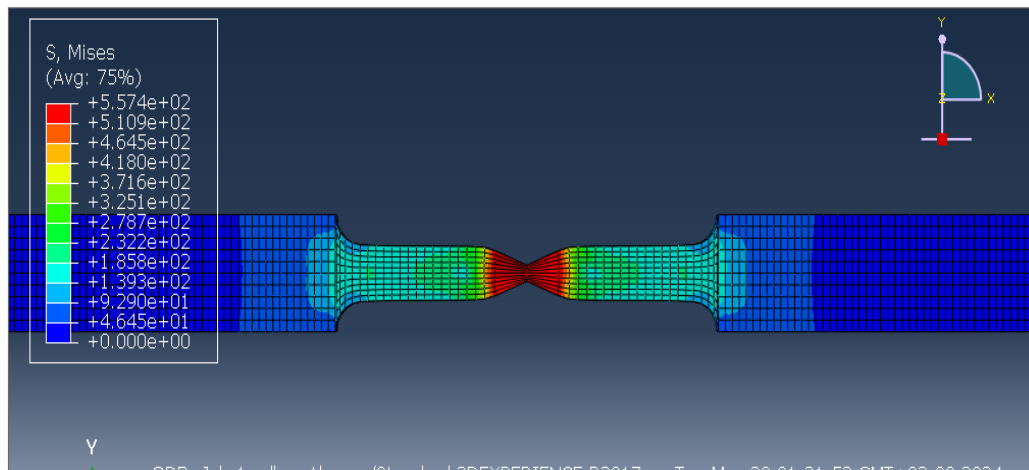
**Figure 4. 24 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 10$

**2.8.4 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 15$**



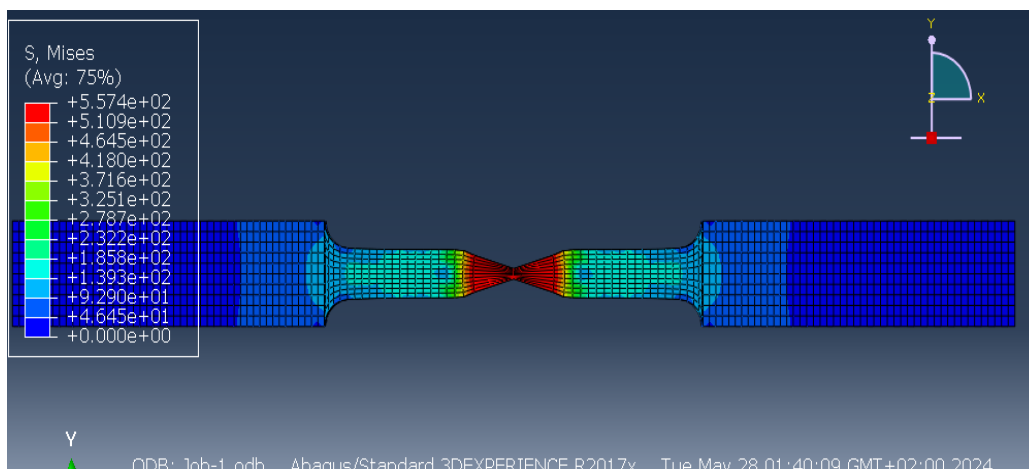
**Figure 4. 25 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 15$

**2.8.5 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 20$**



**Figure 4. 26 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 20$

**2.8.6 Visualisation des étapes de déformations de l'éprouvette par traction pour  $\epsilon : 25$**



**Figure 4. 27 :** Visualisation de déformations pour  $\epsilon : 25$

2.9 Modélisation des courbes réel par Abaqus calibration :

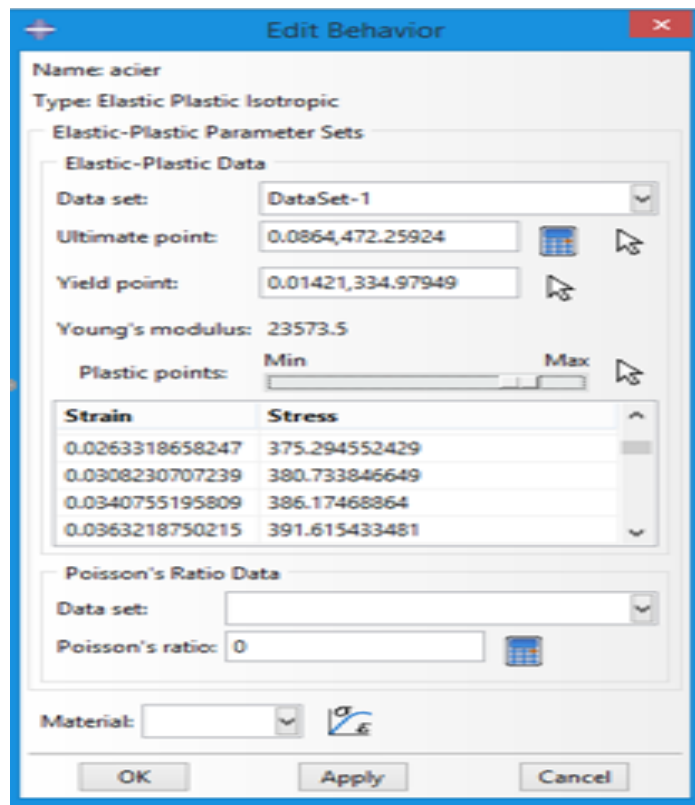


Figure 4. 28 : Comportement d'édition

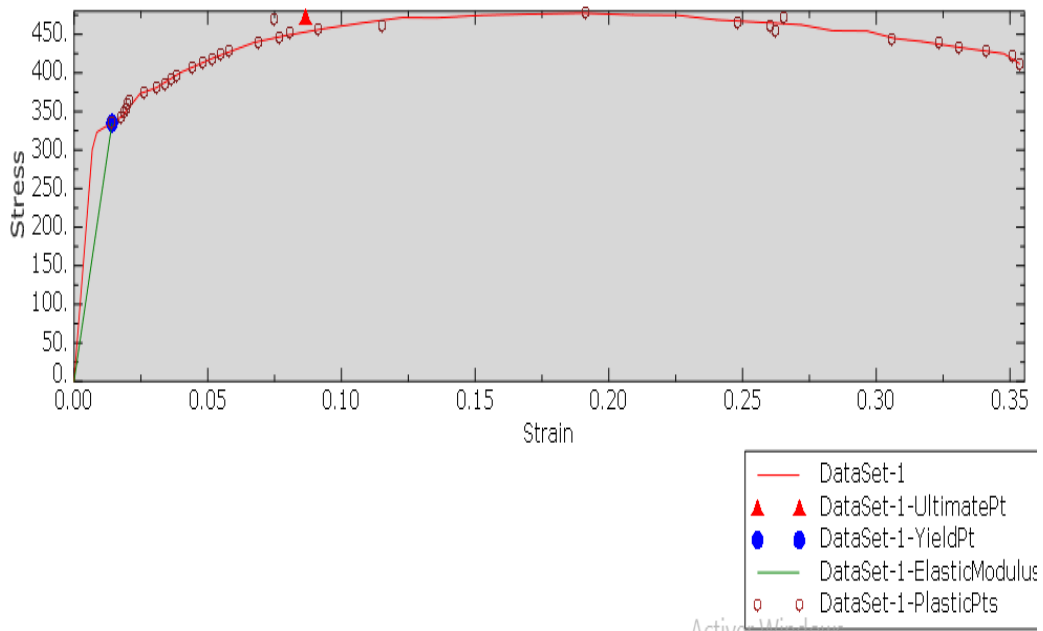


Figure 4. 29 : Modélisation des courbes réel

### 3 Modélisation dynamique (Dynamic explicit)

La modélisation dynamique explicite nous permet de visualiser la distribution des contraintes au point de rupture

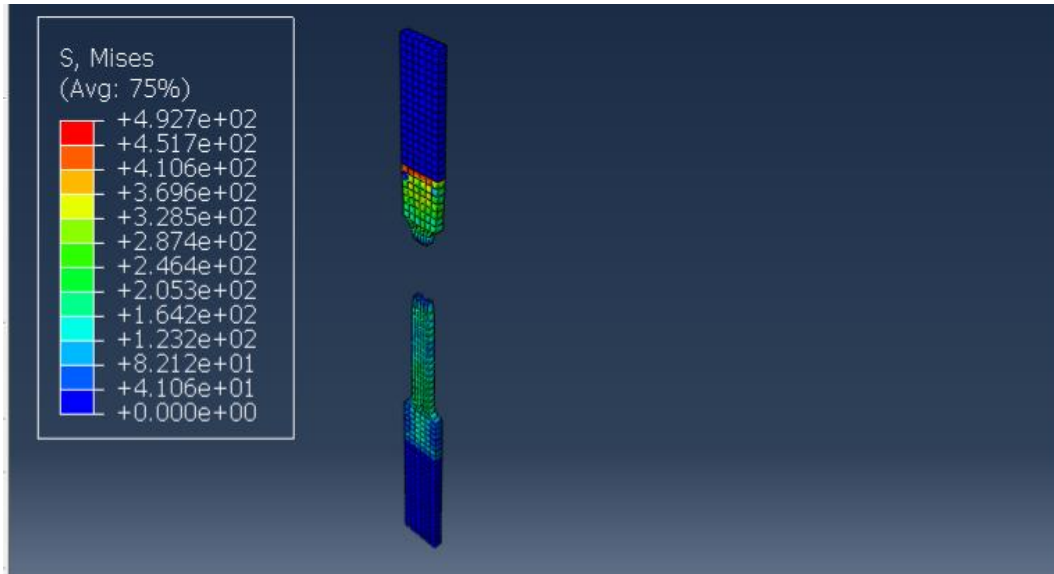


Figure 4. 30 : Répartition des contraintes de Von-Mises après rupture

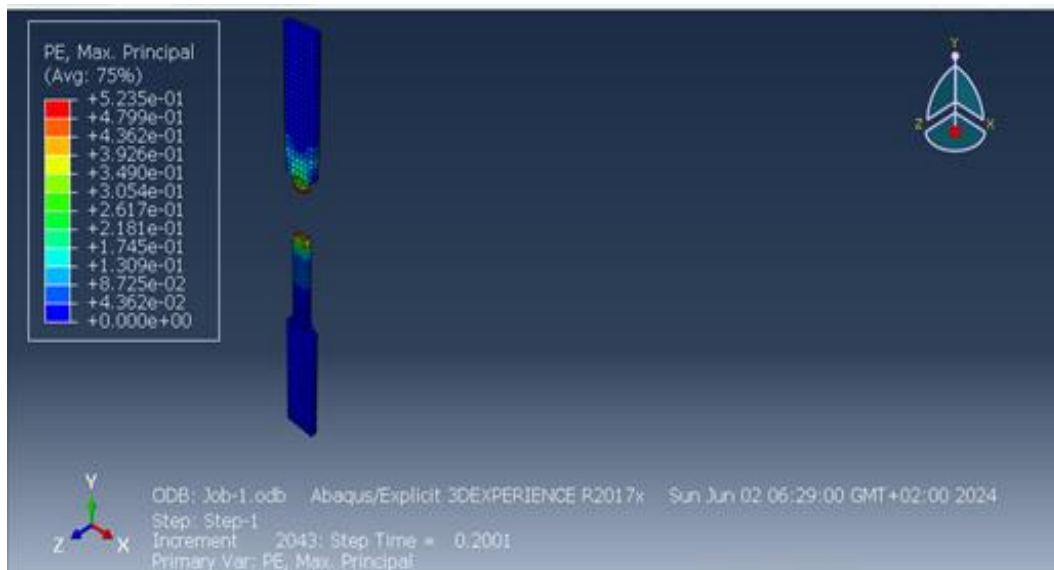


Figure 4. 31 : Répartition des contraintes plastiques après rupture

## 4 Analyse

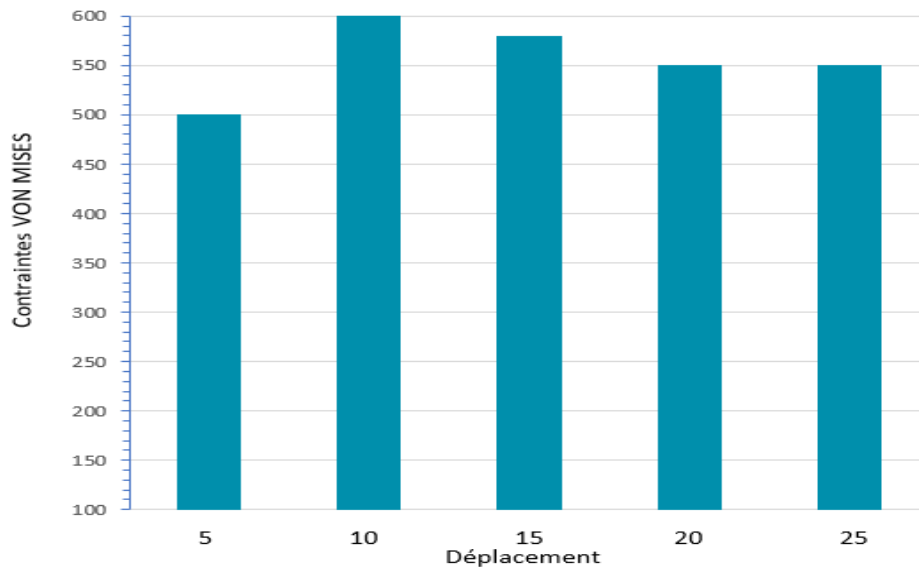
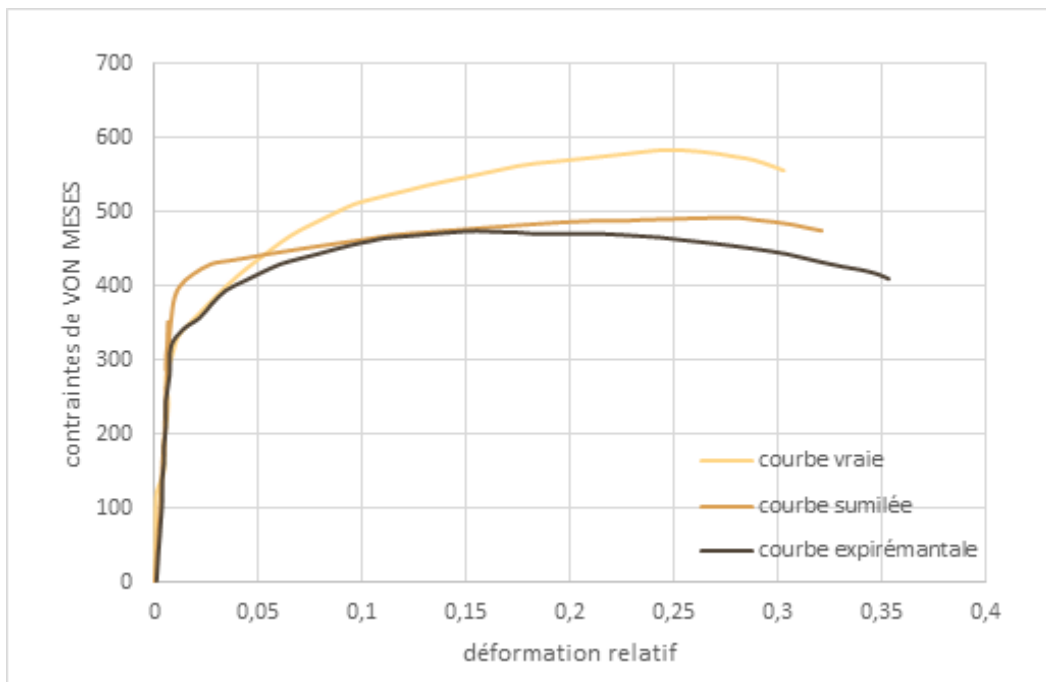


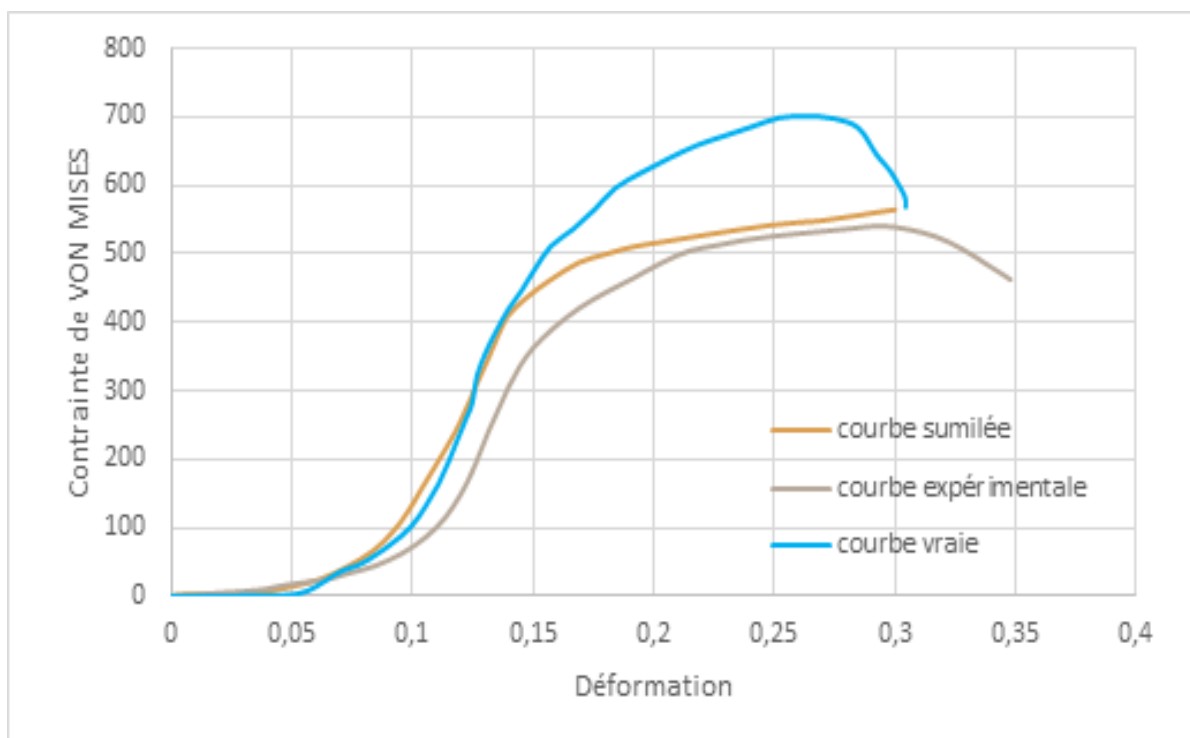
Figure 4. 30 : Histogramme des Contraintes maximales en fonction de l'allongements

### 4.1 Interprétation

L'historgramme des contraintes maximales de Von Mises en fonction de l'allongement montre que les contraintes maximales varient avec le déplacement, atteignant un pic pour des déplacements de 10 et 15 mm, puis diminuant légèrement pour des déplacements de 20 et 25 mm. Ces variations peuvent être attribuées à plusieurs facteurs. Les déplacements de 10 et 15 mm semblent correspondre à des conditions optimales où le matériau atteint sa résistance maximale avant de commencer à céder ou à se déformer de manière plastique. Pour des déplacements supérieurs (20 et 25 mm), la contrainte maximale diminue, indiquant que le matériau subit des déformations accrues, réduisant ainsi sa capacité à supporter des contraintes élevées. Cela suggère que le matériau peut supporter des contraintes maximales élevées à des niveaux de déplacement modérés avant que ses performances ne commencent à diminuer.



**Figure 4. 31 :** Illustration de la courbe rationnelle et conventionnelle du matériau de base X42.



**Figure 4. 32 :** Illustration de la courbe rationnelle et conventionnelle du matériau soudé

## 4.2 Interprétation

Les courbes ci-dessus présentent une étude comparative entre la courbe conventionnelle (expérimentales) contraintes déformation et la courbe réelle(rationnelle).

#### 4.2.1 Éprouvette sans Soudure (figure 4.31)

##### Courbe Vraie :

- Montée rapide de la contrainte jusqu'à environ 0,05 de déformation, suivie d'une augmentation continue, atteignant un pic à environ 600 MPa avant de diminuer légèrement.

##### Courbe Simulée :

- Tendances similaires à la courbe vraie, avec une montée initiale rapide, atteignant un pic à environ 550 MPa, puis montrant une légère diminution.

##### Courbe Expérimentale :

- Montée rapide initiale, atteignant une contrainte maximale d'environ 500 MPa autour de 0,1 mm de déformation, puis restant relativement stable avec une légère baisse au-delà de 0,2 mm de déformation.

#### 4.2.2 Éprouvette avec Soudure (figure 4.32)

##### Courbe Vraie :

- Montée rapide de la contrainte jusqu'à environ 0,05 mm de déformation, suivie d'une augmentation continue, atteignant un pic à environ 700 MPa avant de diminuer légèrement.

##### Courbe Simulée :

- Tendances similaires à la courbe vraie, avec une montée initiale rapide, atteignant un pic à environ 600 MPa, puis montrant une légère diminution.

##### Courbe Expérimentale :

- Montée rapide initiale, atteignant une contrainte maximale d'environ 550 MPa autour de 0,1 mm de déformation, puis restant relativement stable avec une légère baisse au-delà de 0,2 mm de déformation.

Les courbes montrent des différences significatives entre les échantillons avec et sans soudure, ainsi qu'entre les résultats expérimentaux, théoriques et simulés. Pour les éprouvettes sans soudure, les résultats de simulation sont en bon accord avec les valeurs théoriques, mais

légèrement supérieurs aux résultats expérimentaux. Pour les éprouvettes avec soudure, la courbe vraie montre une contrainte maximale significativement plus élevée que les courbes simulée et expérimentale, ce qui peut indiquer des effets de renforcement théoriques non entièrement capturés dans les simulations et les tests expérimentaux. Les résultats expérimentaux pour les éprouvettes avec soudure montrent des contraintes maximales inférieures, probablement dues aux imperfections et aux défauts introduits par le processus de soudage.

## **5 Conclusion**

L'analyse comparative des courbes de contrainte de Von Mises en fonction de la déformation relative pour des éprouvettes avec et sans soudure, ainsi que leur simulation à l'aide du logiciel Abaqus, a révélé des différences significatives dans les comportements mécaniques des matériaux.

Le modèle de simulation prédit avec précision le comportement élastique initial et le plastique précoce, mais peut nécessiter des ajustements dans la région pic. Le matériau peut ne pas fonctionner aussi bien dans des conditions réelles que prévu, peut-être en raison d'imperfections matérielles, de conditions environnementales ou de limitations de configuration expérimentales.

---

## Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a permis d'approfondir la compréhension du comportement mécanique des joints de soudure de pipelines en acier API 5L sous des conditions de traction. L'étude combinait des approches expérimentales et numériques pour fournir une analyse complète et fiable.

### – Étude Expérimentale

Dans l'expérimentale on a consisté à réaliser des essais de traction sur des échantillons de joints de soudure de pipelines API 5L. Les résultats obtenus ont mis en évidence les caractéristiques mécaniques essentielles telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture. Ces données ont servi de base pour valider les modèles numériques.

### – Modélisation par Abaqus

La modélisation numérique, effectuée à l'aide du logiciel Abaqus, a permis de simuler le comportement des joints de soudure sous traction. La modélisation a intégré les paramètres matériaux obtenus expérimentalement ainsi que les caractéristiques géométriques spécifiques des joints soudés. Les simulations ont été calibrées et validées par comparaison avec les résultats expérimentaux.

Les résultats montrent une bonne concordance entre les simulations et les données expérimentales, confirmant la capacité du modèle numérique à reproduire fidèlement le comportement du matériau sous contrainte. La modélisation par éléments finis a permis d'identifier les zones critiques de concentration de contraintes, ce qui est essentiel pour évaluer la fiabilité et la durabilité des joints de soudure.

En conclusion, ce projet a démontré que la combinaison d'essais expérimentaux et de modélisations numériques est une approche efficace pour comprendre et prédire le comportement des joints de soudure de pipelines, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des infrastructures de transport de fluides.

## Références

- [1] Principe de l'essai de traction, roc Dacier, 2017
- [2] What Is Stress-Strain Curve? - xometry.com. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/stress-strain-curve/>. Le 29/02/2024
- [3] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007
- [4] Fiche compact 5 CNC
- [5] Coefficient de Poisson : qu'est-ce que c'est ? - FUTURA.com. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-coefficient-poisson-2068/>. Le 22/02/2024.
- [6] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir1975.
- [7] Contraintes résiduelles - Au cœur des matériaux cristallins. <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM6uc1-5.html>. Le 03/03/2024
- [8] DAHAOUI Mourad, Mémoire de Magistère en génie mécanique Endommagement et Fiabilité des Matériaux, Université de Tlemcen, 2012.
- [9] Christophe B, Ponjet J : « Mécanique des solides déformables », Hermès Science Publications, Paris, 2000
- [10] Nelson. D.V, Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials.
- [11] EDGAR S. Bain, Functions of the alloying Elements in steel, Pitsburg, Pa., U.S.A., 1939.
- [12] Jean-Pierre basset, Patrice Cartraud, Christian Jacquot, Antoine Leroy, Bernard Peseux, pierre Vaussy Introduction à la résistance des matériaux centrale Nantes
- [13] Modèle de plasticité de Tresca- 2018 SolidWorks.com. [https://help.solidworks.com/2018/French/SolidWorks/cworks/c\\_Plasticity\\_Tresca\\_Model.htm?format=P&value=](https://help.solidworks.com/2018/French/SolidWorks/cworks/c_Plasticity_Tresca_Model.htm?format=P&value=). Le 27/03/2024

- [14] G FRADE, Métallographie essais mécaniques, 1970.
- [15] Abdul Hai Alami, Encyclopédie du stockage de l'énergie, 2022
- [16] CHIBANE Noureddine. MEMOIRE DE MASTER EN maintenance industriel. Université de Tlemcen, 2015,2016.
- [17] Adrien CELLIER et Antoine MORANDEAU, Rapport : Projet de Fin d'Etude Simulation numérique de l'usinage avec ABAQUS/LAROCHE Yohann & NARCISSE Julien 5A DMS Polytech tours, 2011/2012.
- [18] Guide du débutant de l'utilisation d'Abaqus - avenao.com.  
<https://www.avenao.com/fr/blog/guide-du-debutant-de-lutilisation-dabaqus>. 19/05/2024
- [19] DEGHBODJ Samir, Logiciels de simulation numérique en mécanique ABAQUS, 2019