

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU.

Faculté du Génie de la Construction.

Département de Génie Mécanique.



Mémoire de fin d'études



**En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie
mécanique**

Option : Construction mécanique

Thème

**Etude du comportement mécanique d'un acier inox : Influence
de l'orthotropie et des concentrateurs de contraintes**

Par

DOUALI AMINA

Proposé et dirigé par :

OULD OUALI Mohand

Promotion 2021 /2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury qui ont eu la lourde tâche d'examiner ce travail.

Je voudrais adresser ma reconnaissance à Monsieur OULD OUALI directeur de ce mémoire pour ses conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier mes professeurs, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Mon cher père, pour sa patience et pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Monsieur LALAMI Salim, pour ses encouragements et ses conseils judicieux, Monsieur CHABI Kamel, qui a contribué à la découpe des éprouvettes, Monsieur MEBTOUCHE Ahmed, qui a su me fournir les documents nécessaire pour accomplir ce travail et à Monsieur CHOUAIB, qui a réaliser les essais de tractions.

Enfin, à ma très chère mère, qui a toujours été là pour moi, et je remercie ma sœur et mon frère, pour leurs encouragements. Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

Je dédie ce projet à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur, Sabrina, pour son encouragement permanent, et son soutien moral,

A mon cher frère, Abd Allah, pour sa patience et son encouragement,

A mes chers cousins et cousine, Yasmine, Amine, Nesrine, Lilia, Ines, lina, Katia et Célia.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes chers amis, Imane, Nihad, pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A me chers camarades de la promotion Master CM 2022.

A mes chers chats.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Sommaire

Remerciements.

Dédicace.

Sommaire.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale.....	1
I Chapitre : Généralité sur l'inox.	4
I.1 Introduction :	4
I.2 Généralités sur l'acier :.....	4
I.2.1 Classification des aciers :	4
I.3 Acier fortement allié :.....	4
I.3.1 Acier inoxydable :	4
I.3.2 Désignation européenne des aciers inoxydables selon la norme NF EN 10088-1 :	5
I.3.2.1 La désignation symbolique :	5
I.3.3 Rôle des éléments d'addition :	6
I.3.4 Classification des aciers inoxydables :.....	6
I.4 Généralités sur les aciers inoxydables austénitiques :.....	7
I.4.1 Composition et structure :	7
I.4.2 Instabilité de l'austénite :	8
I.4.3 Les nuances des aciers inoxydables :	8
I.5 L'acier inoxydable 304L :	9
I.5.1 Définition de l'acier inoxydable 304L :	9
I.5.2 Les caractéristiques mécaniques :	9
I.6 Fabrication des aciers inoxydables :.....	10
I.6.1 L'aciérie :	10
I.6.2 La transformation (le laminage) :.....	11
I.6.2.1 Traitements thermiques des aciers inoxydables :	12
I.6.2.2 Influence du laminage sur les caractéristiques mécaniques :	13
I.6.3 Recuit final :	14
I.7 Rappel sur l'élastoplastique :	14

I.7.1	Décomposition de la déformation totale :	14
I.7.2	Critère de plasticité :	14
I.7.3	Critère isotrope de Von Mises :	15
I.7.4	Coefficient d'anisotropie :	15
I.7.5	Comportement anisotrope avec le potentiel de Hill :	16
I.8	Conclusion :	17
II	Chapitre : Réalisation des éprouvettes en acier 304L et procédure expérimentale	19
II.1	Introduction :	19
II.2	Les éprouvettes :	19
II.2.1	Solidworks :	19
II.3	Conception des éprouvettes :	20
II.3.1	Découpe des éprouvettes :	22
II.3.2	Eprouvettes obtenues :	23
II.3.2.1	Direction de laminage :	23
II.3.3	Avantages et inconvénients de la découpe au jet d'eau :	24
II.3.4	Ebarbage des éprouvettes :	25
II.4	Essai de traction :	26
II.5	La machine de traction :	26
II.6	Géométries des éprouvettes :	27
II.7	Caractéristique de l'essai de traction :	29
II.7.1	Diagramme conventionnel de traction :	29
II.7.2	Diagramme rationnel de traction :	31
II.8	Résultats expérimentale :	32
II.8.1	Eprouvettes dédiée à l'essai :	32
II.8.2	Courbe conventionnelles :	33
II.8.3	Courbe rationnelle :	35
II.9	Conclusion :	36
III	Chapitre : Simulation numériques et résultats.	38
III.1	Introduction :	38
III.1.1	Historique :	38
III.1.2	Définitions de la méthode des éléments finis :	38
III.1.3	Modélisation et discrétisation :	39
III.1.4	ABAQUS :	40

III.2	Simulation numérique :	42
III.2.1	Conditions aux limites :	42
III.2.2	Maillage des modèles :	42
III.2.3	Eprouvettes :	42
III.2.4	Calibrage du modèle :	45
III.3	Résultat de la simulation :	45
III.3.1	Eprouvette de standard :	45
III.3.2	Comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes de simulation : ..	47
III.3.3	Eprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$:	48
III.3.4	Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$:	49
III.3.5	Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$:	50
III.3.6	Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$:	51
III.4	Courbes force/Déplacement à 0° :	52
III.5	Courbes force/Déplacement à 45° :	52
III.6	Courbes force/Déplacement à 90° :	53
III.7	Conclusion :	54
	Conclusion générale	55
	Reference bibliographique	56

Liste des figures

Figure I.1 Acier inoxydable (couche passive).....	5
Figure I.2 Schéma de la fabrication des aciers inoxydables / l'aciérie.	11
Figure I.3 Schéma de la fabrication des aciers inoxydables / le laminage à chaud	12
Figure II.1 Logo SOLIDWORKS	19
Figure II.2 Epreuve de traction avec dimensions.	20
Figure II.3 Epreuve trouée $r = 2.5\text{mm}$ avec dimensions.....	20
Figure II.4 Epreuve entaillée $r = 2\text{mm}$ avec dimensions.	21
Figure II.5 Epreuve entaillée $r = 4\text{mm}$ avec dimensions.	21
Figure II.6 Epreuve entaillée $r = 8\text{mm}$ avec dimensions.	22
Figure II.7 Centre de découpe jet d'eau.	23
Figure II.8 Epreuves selon les trois directions 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de laminage.	23
Figure II.9 Les trois directions de laminage 0° , 45° et 90°	24
Figure II.10 Epreuve attachée à la tôle	24
Figure II.11 Epreuve avant ébarbage.	25
Figure II.12 Epreuve après ébarbage.	25
Figure II.13 Machine de traction.....	26
Figure II.14 Géométrie de l'épreuve de traction.....	27
Figure II.15 Géométrie de l'épreuve trouée $r = 2.5\text{mm}$	27
Figure II.16 Géométrie de l'épreuve entaillée $r = 2\text{mm}$	28
Figure II.17 Géométrie de l'épreuve entaillée $r = 4\text{mm}$	28
Figure II.18 Géométrie de l'épreuve entaillée $r = 8\text{mm}$	29
Figure II.19 vAllure de la courbe conventionnelle de traction.	29
Figure II.20 Diagramme rationnel de traction.	31
Figure II.21 Epreuve standard destinée à l'essai de traction.	32
Figure II.22 Epreuve trouée destinée à l'essai de traction.....	32
Figure II.23 Epreuve entaillée $r = 2\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.	32
Figure II.24 Epreuve entaillée $r = 4\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.	33
Figure II.25 Epreuve entaillée $r = 8\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.	33
Figure II.28 Superposition des courbes de traction.....	35
Figure II.31 Etape de l'analyse par M.E.F.	40

Figure II.32	Conditions aux limites de l'éprouvette de traction.	42
Figure II.33	Maillage de l'éprouvette de traction.	42
Figure II.34	Conditions aux limites de l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$	43
Figure II.35	Maillage de l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$	43
Figure II.36	Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$	43
Figure II.37	Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$	43
Figure II.38	Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$	44
Figure II.39	Maillage de l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$	44
Figure II.40	Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$	44
Figure II.41	Maillage de l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$	44
Figure III.11	Eprouvette de traction sans chargement.	45
Figure III.12	Eprouvette de traction avec chargement.	45
Figure III.13	superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 0°	46
Figure III.14	Superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 45°	46
Figure III.15	Superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 90°	47
Figure III.16	Superposition des courbes expérimentales et des courbes numériques.	47
Figure III.17	Eprouvette de trouée sans chargement.	48
Figure III.18	Eprouvette de trouée avec chargement.	48
Figure III.19	Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0° , 45° , 90°) pour l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$	48
Figure III.20	Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$ sans chargement.	49
Figure III.21	Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$ avec chargement.	49
Figure III.22	Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0° , 45° , 90°) pour l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$	49
Figure III.23	Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$ sans chargement.	50
Figure III.24	Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$ avec chargement.	50
Figure III.25	Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0° , 45° , 90°) pour l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$	50
Figure III.26	Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$ sans chargement.	51
Figure III.27	Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$ avec chargement.	51

Figure III.28 Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0° , 45° , 90°) pour l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$	51
Figure III.29 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 0°	52
Figure III.30 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 45°	53
Figure III.31 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 90°	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 Intervalle de composition chimique des aciers inoxydables austénitiques.	8
Tableau I.2 Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 304.....	9
Tableau I.3 Composition chimique de l'acier inoxydable 304L.....	10
Tableau I.4 Traitements thermiques des aciers inoxydables.....	13
Tableau II.1 Valeurs numériques des caractéristiques mécaniques de l'inox 304L.	33
Tableau II.2 Caractéristiques mécanique de l'inox 304L.	34
Tableau II.3 Le module d'Young selon les trois directions.....	34
Tableau II.4 Les valeurs calculées des coefficients d'anisotropie.	36
Tableau III.1 Calibrage du modèle.....	45

Introduction générale

Vue les caractéristiques physiques, mécaniques et métallurgiques etc., les aciers inoxydables sont utilisés dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie, nucléaire, pétrolière, mécanique, hydraulique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine ...

En effet, les aciers inoxydables austénitiques possèdent une bonne résistance à la corrosion, ainsi que de bonnes propriétés mécaniques. Ils ont une forte résistance et une forte capacité d'érouissage et sont ductiles. Par ailleurs, ils constituent donc des matériaux de structure particulièrement intéressants et sont très largement employés dans diverses industries.

D'autre part, la maîtrise du comportement des matériaux pendant leur mise en œuvre et en service est une nécessité dans le monde de l'industrie actuel. Le développement des moyens informatiques permet de limiter les études expérimentales coûteuses au profit des modèles numériques. Ces modèles numériques permettent à la fois de simuler entre autre des essais mécaniques et de mieux comprendre les phénomènes intervenant au cours de ces essais.

La simulation numérique a fait des progrès considérables durant les dix dernières années, suite à l'évolution continue de la puissance des calculateurs, parmi les logiciels de simulation on peut citer ABAQUS, ANSYS, PATRAN...etc. Grace à des algorithmes de plus en plus robustes, la méthode des éléments finis peut traiter des problèmes non linéaires issus du comportement du matériau et de la géométrie de la pièce.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du comportement mécanique des tôles d'un acier inoxydable 304L par deux approches ; expérimentale et numérique. Les résultats expérimentaux obtenus à partir d'essais mécaniques réalisés au niveau du laboratoire de l'université de Boumerdès sont utilisé pour d'une part étudier les caractéristiques mécaniques de la tôle en inox et d'autre part servir de comparaison aux prédictions numériques de cette étude.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres ;

Le premier chapitre, constitue une étude bibliographique elle-même divisée en deux parties ; la première partie, représente un bref rappel sur les aciers en générale et sur les aciers inoxydables en particulier et la fabrication des aciers inoxydables. La deuxième partie, constitue un rappel sur le comportement élastoplastique.

Le deuxième chapitre, concerne la réalisation et découpe des éprouvettes en inox 304L, et la procédure expérimentale et les résultats obtenues des essais de traction.

Le troisième chapitre qui est lui aussi divisé en deux parties. La première partie, est dédiée à la présentation du code de fonctionnement des éléments finis ABAQUS et la simulation des

modèles utilisés dans cette étude. La deuxième partie regroupe les résultats numériques, après identification des paramètres du matériau, nous avons effectué des comparaisons entre les prédictions numériques avec les résultats expérimentaux.

Chapitre I :

Généralité sur l'inox.

I Chapitre : Généralité sur l'inox.**I.1 Introduction :**

L'acier est l'un des principaux matériaux structurels au monde, c'est un alliage métallique il est employé dans pratiquement tous les secteurs : l'automobile, la construction, l'ingénierie mécanique, la construction navale, les appareils domestiques, les ordinateurs et les produits électroniques grand public. L'acier est constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone, c'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferronickels par exemple, dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux aciers et plus précisément l'acier inoxydable.

I.2 Généralités sur l'acier :

Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), « on appelle acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ». [1]

I.2.1 Classification des aciers :

L'acier est divisé en trois catégories principales :

- Acier non allié.
- Acier allié :
 - Acier faiblement allié
 - Acier fortement allié.

Nous allons nous intéresser aux aciers fortement allié ;

I.3 Acier fortement allié :

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc. [2]

I.3.1 Acier inoxydable :

L'acier inoxydable aussi connu sous la contraction « inox » est un alliage métallique ferreux. Il contient plus de 50 % de fer, un minimum de 10,5 % de chrome et un maximum de 1,2 % de carbone.

L'une des propriétés la plus importante des aciers inoxydables est sa résistance à la corrosion. La résistance de ses alliages métalliques aux attaques chimiques des produits corrosifs, provient

de leur faculté à s'auto-protéger par la formation spontanée à leur surface d'un film complexe d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelé « couche passive » qui protège le substrat métallique de la corrosion généralisée et des attaques localisées. Cette couche extrêmement mince, d'une épaisseur de l'ordre de 1,0 à 2,0 nm, rend négligeable la vitesse de corrosion. [3]

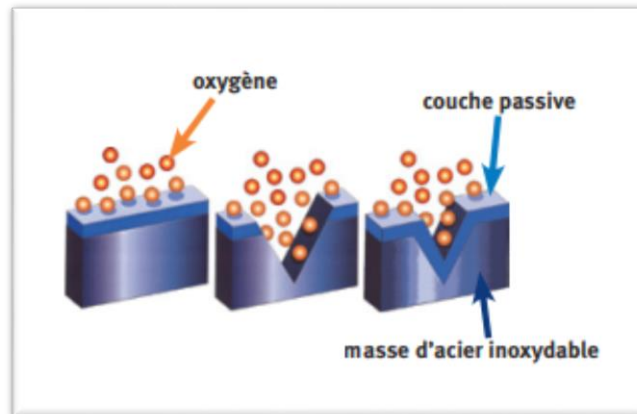


Figure I.1 Acier inoxydable (couche passive).

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliore la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires). [4]

I.3.2 Désignation européenne des aciers inoxydables selon la norme NF EN 10088-1 :

Les spécifications concernant la composition chimique et les propriétés physiques des aciers inoxydables sont listées dans la norme européenne 10088-1 : « liste des aciers inoxydables ».

I.3.2.1 La désignation symbolique :

La désignation symbolique donne la composition chimique des principaux éléments d'alliage de la nuance considérée, comme dans l'exemple de X2CrNiMoN 18-9

La première lettre X signifie qu'il s'agit d'un acier allié dont la teneur d'au moins un des éléments d'alliage est égale ou supérieure à 5 % ;

La première valeur indique la teneur moyenne en carbone, exprimée en centième de pour-cent (pourcentage x 100) ;

Les groupes de lettres (Cr, Ni, Mo, etc.) représentent les symboles chimiques des éléments d'alliages rangés par ordre décroissant de teneurs ;

La série de nombres en fin de désignation (séparés par des traits d'union) correspond aux teneurs moyennes des éléments d'alliage. Ces nombres sont rangés dans l'ordre des symboles des éléments qui précèdent.

Parfois, un élément rajouté volontairement en faible quantité – sans être considéré comme un résiduel sera indiqué en fin du groupe de lettres (Ti, N, Nb, etc.). Sa teneur, trop faible, n'est pas indiquée. [5]

I.3.3 Rôle des éléments d'addition :

- **Le chrome :**

Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est-à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne 10088-1, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 12 % en masse de chrome et moins de 2 % de carbone. C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.

- **Le carbone :**

La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures (notamment de carbures de chrome, qui est un composé très stable mais qui n'empêche pas l'oxydation du fer). [6]

- **Autres éléments :**

Le nickel : favorise la formation de structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement. [7]

Le molybdène et le cuivre : améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.

Le tungstène : améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

Le titane : doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC).

Le niobium : a un point de fusion beaucoup plus élevé le niobium présente des propriétés semblables que le titane.

Le silicium : joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré chaud). [7]

I.3.4 Classification des aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grandes familles possédant chacune leurs propres caractéristiques : Aciers inoxydables martensitiques, Aciers inoxydables ferritiques, Aciers inoxydables austénitiques et Aciers inoxydables austéno-ferritiques ou duplex.

1. Aciers inoxydables martensitiques :

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel. [8]

Exemples : X20Cr13, X46Cr13, X29CrS13.

2. Aciers inoxydables austénitiques :

En principe, les aciers inoxydables austénitiques contiennent généralement entre 0,02 et 0,10 % de carbone, 17 à 20 % de chrome, 7 à 25 % de nickel et 2 à 5 % de molybdène. Nous allons plus tard étudier cette famille en détail.

3. Aciers inoxydables ferritiques :

Ces aciers sont essentiellement des alliages de chrome dans une fourchette de 10,5% à 30%, mais à très faible teneur en carbone (0,08% par rapport aux martensitiques), ce qui les rend économiques et avec des propriétés de résistance à la corrosion et de dureté raisonnablement bonnes. De plus, contrairement aux austénitiques, ils sont magnétiques. Certains degrés peuvent contenir du molybdène, du silicium, de l'aluminium, du titane et du niobium qui leur confèrent des caractéristiques différentes. [9]

Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17.

4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques ou duplex :

Les aciers duplex présentent des parts presque égales de ferrite et d'austénites. Cette fusion permet d'avoir des métaux dont les caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles des aciers inoxydables austénitiques ou ferritiques. Les aciers duplex ont un allongement à la rupture qui avoisine les 40 %. On les utilise généralement dans des environnements où la température est inférieure à 300 ° C. [8]

I.4 Généralités sur les aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers inoxydables austénitiques, ce sont, de loin, les plus connus et les plus employés parmi les aciers inoxydables : ils contiennent, outre une teneur en Chrome minimale de l'ordre de 17%, du Nickel (généralement 7% et plus) et des additions éventuelles de Molybdène, Titane, Niobium, ... etc. Ils sont par contre très indiqués, de par leur absence de fragilité à basse température, pour les emplois cryogéniques [10].

Le fait que leur structure cristallographique soit de type cubique à faces centrées leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelles depuis les températures très basses jusqu'à plusieurs centaines de degrés Celsius. [9]

I.4.1 Composition et structure :

Les aciers inoxydables austénitiques conservent à température ordinaire la structure austénitique cubique à faces centrées, généralement à grains fins, obtenues par trempe depuis

une température d'austénitisation de l'ordre de 1000-1100°C. Ces aciers représentent le groupe d'aciers inoxydables le plus utilisé dans la pratique [11].

En dehors du chrome, le nickel constitue le plus important des éléments d'alliage. Les aciers inoxydables austénitiques sont couramment appelés 18-8 ou 18-10 d'après leurs teneurs respectives en chrome et en nickel [12].

Élément	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	N
% massique	< 0.15%	16 à 30%	4 à 22%	0 à 2%	0 à 3%	0 à 4%	0 à 0.4%

Tableau I.1 Intervalle de composition chimique des aciers inoxydables austénitiques.

I.4.2 Instabilité de l'austénite :

La structure austénitique dans ces alliages est parfaitement stable à haute température, mais à la température ambiante, cette structure se trouve dans un état métastable. L'austénite n'est pas la phase d'équilibre et peut se transformer en une autre phase dite martensitique [13].

En général, la déstabilisation de l'austénite dans ces types d'acier peut se produire par deux mécanismes de transformation martensitique due au refroidissement et à la déformation plastique. [14]

I.4.3 Les nuances des aciers inoxydables :

Il y a plus de 150 catégories d'acier inoxydable, dont quinze sont les plus courants. L'AIISI (Institut Américain de Sidérurgie) définit, en outre, les catégories suivantes :

- Séries 200 — alliage austénitique fer-chrome-nickel-manganèse
- Séries 300 — alliage austénitique fer-chrome-nickel
- Type 301—fortement ductile. Durcit, en outre rapidement pendant le travail mécanique.
- Type 303—version d'usinage du 304 via une addition de soufre.
- Type 304—le plus commun ; l'acier inoxydable classique 18/8
- Type 316—une addition de molybdène est allié pour empêcher la formation de corrosion spécifique
 - Séries 400 — alliage ferritique et martensitique. [15]
- L'acier inoxydable 301 : Un des aciers inoxydables austénitiques les plus simples. Sa résistance à la corrosion est très inférieure à celle de type 304 par exemple. Mais elle est globalement supérieure à celle des aciers inoxydables ferritiques ou martensitiques. L'inox 301 se forme facilement à froid (pliage, étampage, emboutissage).
- L'acier inoxydable 304 et 304L : c'est le type d'inox le plus utilisé. Il est suffisamment résistant à la corrosion pour la plupart des applications intérieures et non agressives. En essence, la qualité n'est pas magnétique dans son état chauffé à blanc mais cet inox peut devenir légèrement magnétique par traitement à froid. Il est appliqué à grande échelle dans la construction de machine, dans le secteur alimentaire et pharmaceutique et pour

les applications intérieures dans le secteur de la construction, comme les rampes. La différence entre l'inox 304 et l'inox 304L réside dans le carbone (L représente un faible taux de carbone), présentant moins de risque de corrosion après la soudure. [15]

- L'acier inoxydable 316 et 316 L : Ce sont les frères plus résistants à la corrosion que l'inox 304(L). Là encore, L signifie Low Carbon et il a la même fonction que pour l'inox 304. Une fois de plus, C'est un acier inoxydable et résistant à la chaleur. Il trouve son application dans les environnements et les produits agressifs, la construction (applications extérieures) et il est également utilisé régulièrement dans le secteur pharmaceutique et chimique. En dehors d'une résistance plus élevée à la corrosion, cette qualité d'inox est similaire à l'inox 304. [15]

I.5 L'acier inoxydable 304L :

I.5.1 Définition de l'acier inoxydable 304L :

L'acier inox 304 est l'acier inoxydable le plus largement utilisé, contenant 18-20 % de Cr et 8-10.5 % de Ni, également connu sous le nom d'acier inoxydable 18-8. L'acier inoxydable 304 est non magnétique dans des conditions de recuit, mais après un travail à froid (comme l'emboutissage, l'étirage, le pliage, le laminage), une partie de la structure austénitique peut être convertie en martensite et donc faiblement magnétique. La matière 304 a une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et à l'oxydation. La teneur élevée en alliage nickel-chrome lui confère une excellente résistance à la corrosion et est largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme acier inoxydable de qualité alimentaire standard.

Il existe plusieurs variantes d'acier inoxydable 304, telles que la version à très faible teneur en carbone l'inox 304L, la version contenant de l'azote 304N, 304H avec des performances de fluage améliorées. [15]

I.5.2 Les caractéristiques mécaniques :

Les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 304 L sont répertoriées dans la fiche technique ci-dessous. [15]

Propriétés de l'acier inoxydable 304L	Métrique
Densité	7.93
Module d'élasticité	200 GPa

Tableau I.2 Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 304.

I.6 Fabrication des aciers inoxydables :

La fabrication des aciers inoxydables s'effectue en plusieurs opérations successives. Suite à l'élaboration et l'affinage, l'acier est coulé généralement en continu avant de suivre deux cycles de transformation, tout d'abord à chaud puis à froid. Des étapes de finition et/ou de traitement thermique peuvent compléter la chaîne de fabrication.

Depuis le développement du procédé AOD (Argon Oxygen Decarburizing) de l'Union Carbide dans les années 1950-1960, la plus grande partie des produits en aciers inoxydables sont obtenus par cette procédure. La filière four électrique-convertisseur AOD représente plus de 80% de la production des aciers inoxydables. [12,16]

I.6.1 L'aciérie :

L'élaboration des aciers inoxydables s'effectue principalement par fusion dans un four à arc à revêtement réfractaire basique. La charge introduite dans le four est constituée par des ferrailles d'aciers au carbone, des chutes d'aciers inoxydables de compositions compatibles avec la nuance à réaliser, des ferroalliages (de Cr, de Si, de Mn, de Ni, etc.) et des métaux purs.

Composition chimique de l'acier inoxydable 304L :

Nuance	Composition chimique en %					
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
304L	0.03	17 à 19 %	9 à 11%	/	2	1

Tableau I.3 Composition chimique de l'acier inoxydable 304L.

La fusion est provoquée par un arc électrique d'environ 100MW entre la charge et des électrodes de graphite produisant la chaleur nécessaire. Un soufflage d'oxygène accélère le processus de fusion. La fusion au four électrique dure environ deux heures. Le métal liquide obtenu titrant de 1 à 3% de carbone est ensuite versé dans un convertisseur AOD.

L'affinage est une phase de décarburation. L'opération est réalisée par l'intermédiaire de plusieurs tuyères au travers desquelles un mélange gazeux d'argon ou d'azote et d'oxygène est injecté en quantités relatives variables. Le mélange gazeux détermine l'abaissement de la pression partielle de CO et accélère la réaction entre C et O₂. Après la phase de décarburation suit la phase de réduction pendant laquelle le laitier est formé puis ensuite éliminé (décrassage). L'affinage dure moins de 90 minutes. Le procédé AOD permet d'obtenir une haute teneur en Cr, de très faibles teneurs en C et une grande précision analytique sur l'ensemble des éléments.

Le métal liquide est maintenant soumis en poche à diverses opérations. La métallurgie en poche va permettre l'homogénéisation thermique et la mise en température du métal avant d'être coulé.

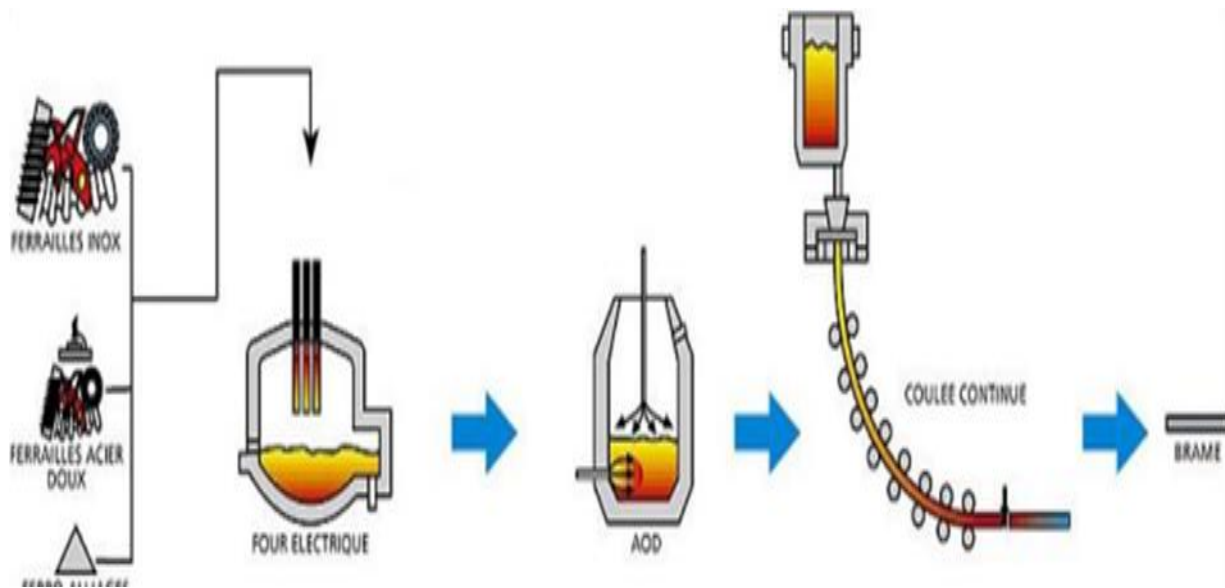


Figure I.2 Schéma de la fabrication des aciers inoxydables / l'aciérie.

Le métal liquide affiné est alors coulé en continu. Le procédé de coulée continue s'est imposé depuis les années 1970. Le principe de la coulée continue est basé sur l'obtention rapide et en continu d'une peau capable de contenir le métal liquide jusqu'à sa solidification complète. Afin de couler en continu sans incident et d'obtenir une qualité suffisante, il est important de respecter les consignes de température, de vitesse, de refroidissement et de protection du métal. Les semi-produits de coulée continue sont des brames (épaisseur de 150 à 250mm et largeur de 600 à 1600mm) ou des blooms (à section carré de 100 à 250mm de côté). [16]

I.6.2 La transformation (le laminage) :

Après la coulée continue, la transformation à chaud (figure I.6) consiste à réduire la section des semi-produits par corroyage. Les brames obtenues à l'aciérie sont transformées en bobines d'épaisseur comprise entre 2 et 14mm. Ces bobines sont appelées bandes noires ou coils noirs. De toutes les opérations de transformation à chaud, le laminage est la plus importante car il concerne l'essentiel du tonnage produit.

Avant la première transformation à chaud, les produits sont tout d'abord débarrassés des plus gros défauts, généralement par meulage. La brame est ensuite réchauffée entre 1100 et 1250°C suivant sa nuance dans un four à longerons mobiles. Elle passe ensuite dans des cages dégrossisseuses où elle est réduite de plus de 50%.

Le laminage à chaud des aciers inoxydables peut se terminer sur des trains continus à bandes ou sur des laminoirs Steckel. Le train à bandes est constitué de 6 ou 7 cages finisseuses successives à la sortie desquelles la brame est réduite à une épaisseur de 2 à 8mm. Après laminage, la température de la bande de métal à l'épaisseur finale est de l'ordre de 1000°C. Cette bande est refroidie par des rampes d'arrosage et finalement bobinée à 700°C environ à une vitesse de l'ordre de 500m/mn.

Durant la transformation à chaud, la température doit être strictement contrôlée afin d'éviter tout grossissement du grain ou risque de brûlure. Les bandes noires (bobines) sont finalement engagées sur une ligne de recuit-grenaillage-décapage. Les aciers inoxydables subissent un recuit qui sert à recristalliser les structures en prévision du laminage à froid. Les oxydes sont enlevés mécaniquement et chimiquement (décapage).

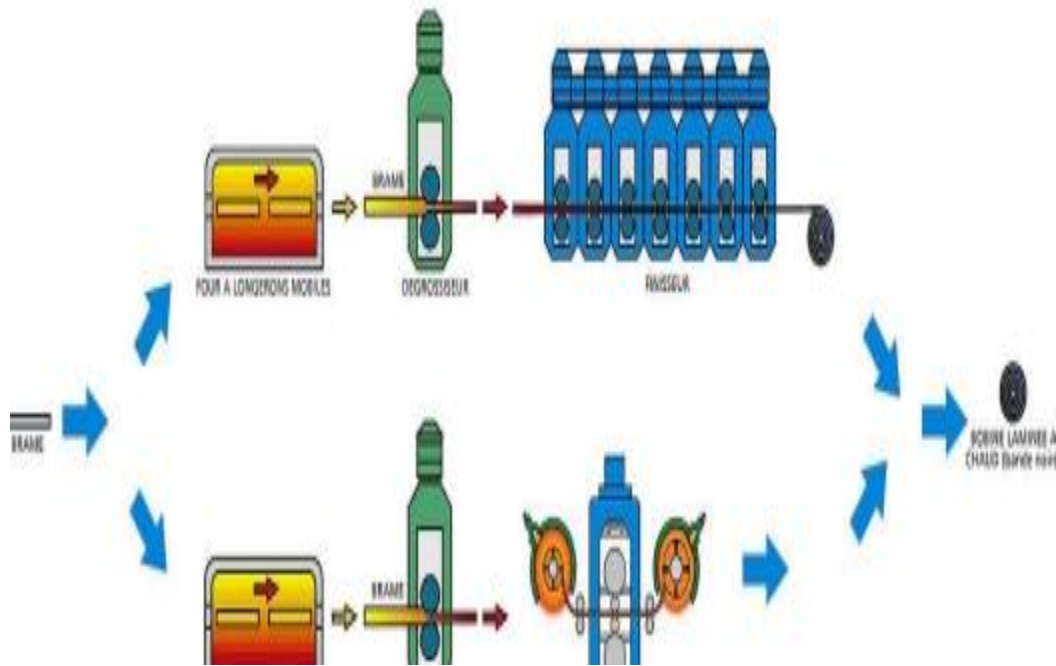


Figure I.3 Schéma de la fabrication des aciers inoxydables / le laminage à chaud

Le laminage à froid s'effectue généralement sur des laminoirs multicylindres de type Sendzimir en une dizaine de passes. La réduction d'épaisseur correspondante est de l'ordre de 75%. Une telle réduction d'épaisseur entraîne un écrouissage important du matériau et il est nécessaire de pratiquer un recuit final qui permet d'obtenir, après recristallisation, les caractéristiques métallurgiques recherchées.

Enfin, plusieurs opérations de finition (skin-pass, mise à dimension, pose de revêtement, polissage...) permettent d'obtenir un produit conforme à la demande du client. [16]

I.6.2.1 Traitements thermiques des aciers inoxydables :

Traitement thermique	Objectif
Homogénéisation	<ul style="list-style-type: none"> • Obtenir une phase homogène.
Durcissement	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter les caractéristiques mécaniques.
Adoucissement	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la ductilité. • Diminuer la fragilité.
Détente	<ul style="list-style-type: none"> • Éliminer une partie des contraintes résiduelles
Traitements superficiels	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la dureté en surface
Désensibilisations	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer la sensibilité à la corrosion intergranulaire due aux carbures de chrome

Tableau I.4 Traitements thermiques des aciers inoxydables.

I.6.2.2 Influence du laminage sur les caractéristiques mécaniques :

Chaque métal est constitué d'un réseau cristallin où se répète un arrangement élémentaire dans 3 directions de l'espace appelé maille. Chaque métal présente un type de maille dépendant de sa nature et sa température et pression. Les mailles que nous rencontrons le plus souvent sont les cubiques centrées et les cubiques à faces centrées. Lorsqu'un acier est à l'état liquide et qu'il refroidit lentement jusqu'à la température ambiante lors de se refroidissement, des grains vont apparaître. Un grain est un ensemble de nombreuses structures cristallines répétitives, toutes orientées dans la même direction, lorsque deux grains orientés dans deux directions différentes se rencontrent, un joint de grains se forme. La taille du grain a une grande influence sur les

caractéristiques mécaniques du métal. Le laminage affine ces grains créant des fibres de laminage, offrant un matériau à haute résistance mécanique avec peu d'inconvénients. [17]

I.6.3 Recuit final :

Le laminage de la tôle produit un durcissement par écrouissage du métal qui devient fragile et inapte à la mise en forme. Le recuit de recristallisation est donc effectué quasi systématiquement après laminage. La structure de l'acier écroui est caractérisée par l'allongement des grains dans la direction de laminage, les grains ont une forme distordue qui dépend du sens de la déformation. Le but de ce recuit sera donc de remanier la structure cristalline afin de retrouver partiellement ou complètement les caractéristiques du métal avant écrouissage. La tôle est ensuite embobinée dans des rouleaux qu'on découpera selon les besoins, pour notre part une tôle de 2m de longueur et 1m de largeur et d'épaisseur 0,6mm a été découpée.

I.7 Rappel sur l'élastoplastique :

I.7.1 Décomposition de la déformation totale :

Le comportement élastoplastique repose sur une décomposition de la déformation totale apparente en deux parties, une partie élastique réversible et une partie élastique irréversible. Quand la partie élastique est suffisamment faible, généralement on adopte une décomposition additive du tenseur taux des déformations :

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_e + \bar{\varepsilon}_p \quad (\text{I.1})$$

$\bar{\varepsilon}_e$: Tenseur de déformation élastique.

$\bar{\varepsilon}_p$: Tenseur de déformation plastique.

Le tenseur taux de déformation total $\bar{\varepsilon}$ correspond, dans l'hypothèse des petites déformations, à la partie symétrique du tenseur gradient du champ de déplacement U qui s'écrit :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\text{grad}(U) + \text{grad}^T(U)] \quad (\text{I.2})$$

L'élasticité traduit une déformation réversible du matériau. Généralement, elle est considérée comme linéaire et isotrope dans le cas des aciers à froid. Dans ces conditions, le tenseur des contraintes de Cauchy σ est relié au tenseur de déformation par la loi de Hooke :

$$\bar{\sigma} = 2\mu\varepsilon^e + \lambda \text{tr}\varepsilon^e \mathbf{I} \quad (\text{I.3})$$

\mathbf{I} : Tenseur identité

μ et λ : sont les coefficient de Lamé déduit à partir des coefficient de Poisson ν et du module d'Young E par les relations suivantes :

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{I.4})$$

I.7.2 Critère de plasticité :

Il existe une grande variété de critères de plasticité qui décrivent le comportement des tôles. Ces derniers sont de deux ordres : les critères isotropes et les critères anisotropes. Parmi tous les critères qui ont été proposés et fréquemment utilisés dans la mise en forme en déformation plastique sont le critère isotrope de Von Mises et le critère anisotrope de Hill 1948.

I.7.3 Critère isotrope de Von Mises :

Le critère de plasticité définit le domaine dans l'espace des contraintes à 3 ou 6 dimensions, à l'intérieur toute variation de contrainte n'engendre que des variations de déformation élastique. Pour des métaux isotropes, qui ont les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions, le régime plastique est obtenu pour des états de contraintes indépendantes de l'orientation du repère dans lequel sont appliquées les contraintes par rapport à un repère matériel quelconque.

L'écoulement plastique des métaux se fait à volume constant. Ce fait justifie l'utilisation de l'hypothèse d'incompressibilité plastique. Du point de vue microscopique, la déformation plastique des matériaux cristallins est générée par le déplacement des dislocations en réponse aux contraintes de cisaillement absentes lors d'un état de contraintes hydrostatique.

Le critère de plasticité de Von Mises est établi en considérant l'écoulement plastique des matériaux insensible à la pression hydrostatique, il est défini dans un repère orthonormé quelconque. Les expressions développées du critère de Von Mises sont : [18]

- Dans le repère des contraintes à 6 composantes :

$$\sigma_{eq}^M = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)]} \quad (I.5)$$

- Dans le cas des contraintes principales à 3 composantes

$$\sigma_{eq}^M = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]} \quad (I.6)$$

La contrainte potentielle de Von Mises est ;

$$f(\sigma) = q \quad \text{ou} \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}} S : S \quad (I.7)$$

Dans lequel S est le tenseur de contrainte déviateur ;

$$S = \sigma - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma) I = \sigma - \frac{1}{3} II : (\sigma) \quad (I.8)$$

I.7.4 Coefficient d'anisotropie :

Les écrouissements à froid importants comme le laminage, le tréfilage se traduisent par la formation de textures cristallographiques conduisant à une anisotropie des propriétés mécaniques. L'influence sur R_p , R_m , $A\%$ est relativement faible, par contre il n'en est pas de même pour la répartition des déformations suivant la largeur b et l'épaisseur a des éprouvettes, en fonction de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à la direction de laminage

DL, dans le cas des tôles ce phénomène important intervient dans les problèmes d'emboutissage profond.

Pour mesurer cette anisotropie, on utilise le rapport r_θ entre la déformation rationnelle en largeur et la déformation rationnelle en épaisseur d'une éprouvette d'une tôle, ou θ représente l'angle entre la direction de traction et la direction de laminage

$$r_\theta = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \quad (I.9)$$

Avec
$$\varepsilon_b = Ln \frac{b_0}{b} \quad \text{et} \quad \varepsilon_a = Ln \frac{a_0}{a} \quad (I.10)$$

Comme la mesure en épaisseur est délicate on effectue, plutôt la mesure d'allongement $\varepsilon_L = Ln \frac{L}{L_0}$. Comme le volume de l'éprouvette reste constant, on déduit ε_a :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_L - \varepsilon_b = Ln \frac{L}{L_0} - Ln \frac{b_0}{b} \quad (I.11)$$

D'où

$$r_\theta = \frac{Ln \frac{b_0}{b}}{Ln \frac{L}{L_0} - Ln \frac{b_0}{b}} \quad (I.12)$$

Plutôt que d'utiliser la courbe $r_\theta = f(\theta)$, on représente l'anisotropie par le coefficient moyen r_{moyen} :

$$r_{moyen} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (I.13)$$

Le coefficient r_{moyen} représente la résistance à l'amincissement d'une tôle. Une valeur élevée de r_{moyen} correspond à une déformation en largeur plus grande qu'en épaisseur. [19]

Pour le coefficient d'anisotropie planaire Δr :

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (I.14)$$

I.7.5 Comportement anisotrope avec le potentiel de Hill :

Dans le cas de comportement anisotrope, le critère d'écoulement plastique le plus souvent utilisé que l'on associe aux matériaux métalliques est le critère de Hill. Il permet de prendre en compte une variation de comportement du matériau dans les directions transverses à la direction de laminage. Pour modéliser cette variation, Hill introduit une matrice d'anisotropie Π qui permet le calcul de la contrainte équivalente comme suit :

$$\sigma_{eq}^H = \sqrt{\frac{3}{2} S : \Pi : S} \quad (I.15)$$

Dans les axes d'orthotropie, l'expression retenue pour la matrice Π s'écrit avec les notations de Voigts :

$$\Pi' = \begin{bmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

Où l'orthotropie est une anisotropie particulière qui se caractérise par trois plans de symétries dont les intersections définissent les trois axes orthotrope (x, y, z).

Le comportement des tôles laminées s'inscrit le plus souvent dans le cadre d'une orthotropie pour laquelle le repère (x, y, z) s'identifie par :

X ou 1 : la direction de laminage.

Y ou 2 : la direction perpendiculaire à la direction de laminage.

Z ou 3 : la direction normale au plan de la tôle.

$$\sigma_{eq}^M = \sqrt{[H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2N(\sigma_{12})^2 + 2M(\sigma_{23})^2 + 2L(\sigma_{13})^2]} \quad (I.17)$$

Où F, G, H, L, M et N sont des constantes obtenues par des essais sur des matériaux dans différentes directions. Elles sont définie par : $F = \frac{r_0}{r_{90}(r_0+1)}$; $G = \frac{1}{r_0+1}$; $H = \frac{r_0}{r_0+1}$;

$$N = \frac{(r_0+r_{90})(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (I.18)$$

I.8 Conclusion :

Au cours de ce chapitre nous avons pu aborder les aciers en général et les aciers inoxydables en particulier, et la description des différentes familles d'inox ainsi que la fabrication et les traitements thermiques des aciers inoxydables. Nous avons aussi abordé brièvement les lois de comportement élastoplastique et le comportement anisotrope des tôles.

Chapitre II :

Réalisation des éprouvettes en acier
304L et procédure expérimentale.

II Chapitre : Réalisation des éprouvettes en acier 304L et procédure expérimentale

II.1 Introduction :

Le matériau utilisé pour l'étude est une tôle laminée en acier inoxydable 304L d'épaisseur 0,6mm que nous allons ensuite soumettre à des essais de traction afin d'obtenir des valeurs qui caractérisent les propriétés du matériau ou qui permettent d'apprécier son comportement lorsqu'il est soumis à une contrainte. Ces valeurs pourront ensuite être utilisées dans des calculs de résistance des matériaux. Pour cela nous avons découpé cette tôle pour obtenir des échantillons que nous appellerons éprouvette, selon les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage.

II.2 Les éprouvettes :

Afin de réaliser des essais de tractions, Nous avons découpé des éprouvettes sur la tôle en acier inoxydable 304L d'épaisseur 0,6mm, selon les trois directions qui sont selon le sens de laminage 0°, 45° et 90°, pour cela nous avons utilisé Solidworks comme logiciel de conception.

II.2.1 Solidworks :

SolidWorks est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows.

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique.

De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle. [20]



Figure II.1 Logo SOLIDWORKS

II.3 Conception des éprouvettes :

a. Eprouvette de standard :

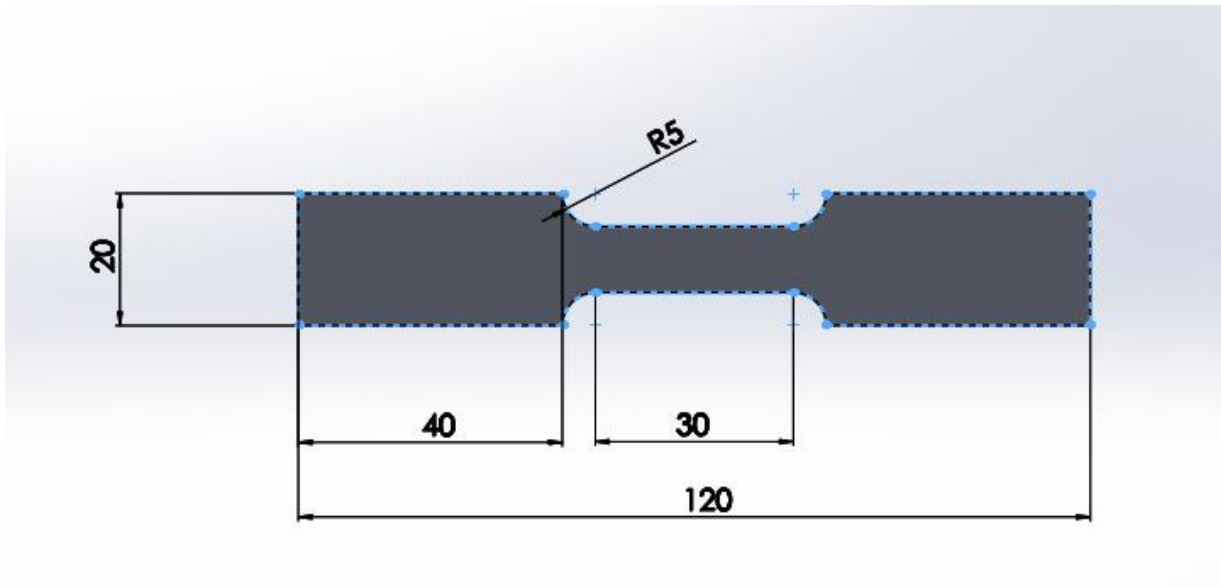


Figure II.2 Eprouvette de traction avec dimensions.

b. Eprouvette trouée r = 2.5mm :

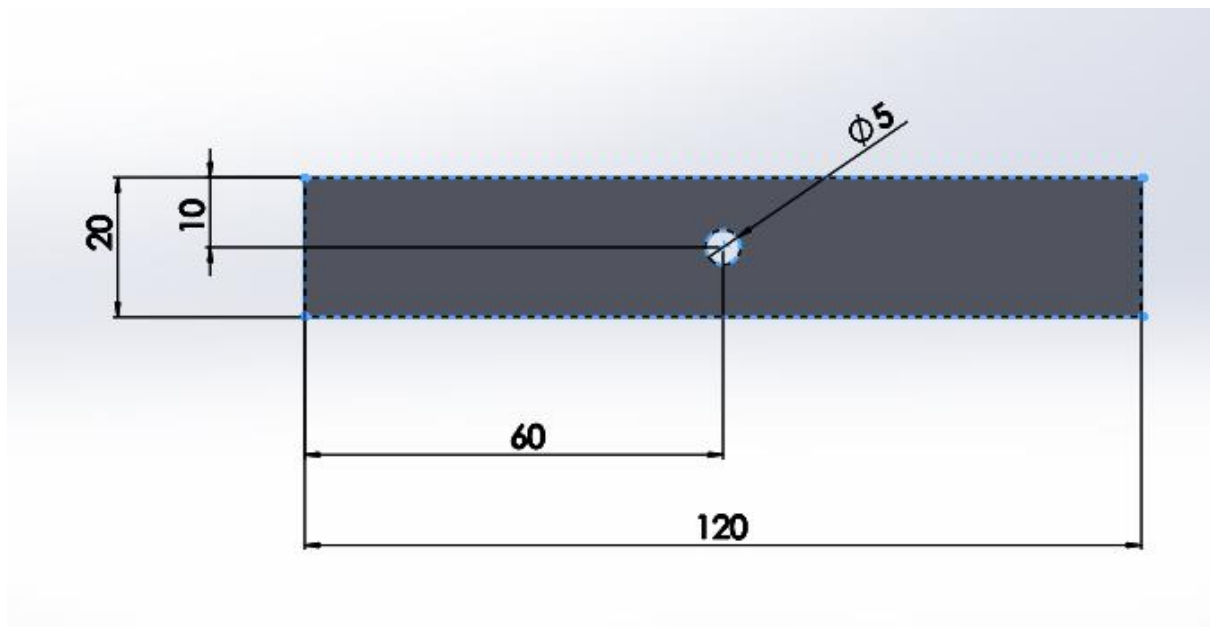


Figure II.3 Eprouvette trouée r = 2.5mm avec dimensions.

c. Epreuve entaillée $r = 2\text{mm}$:

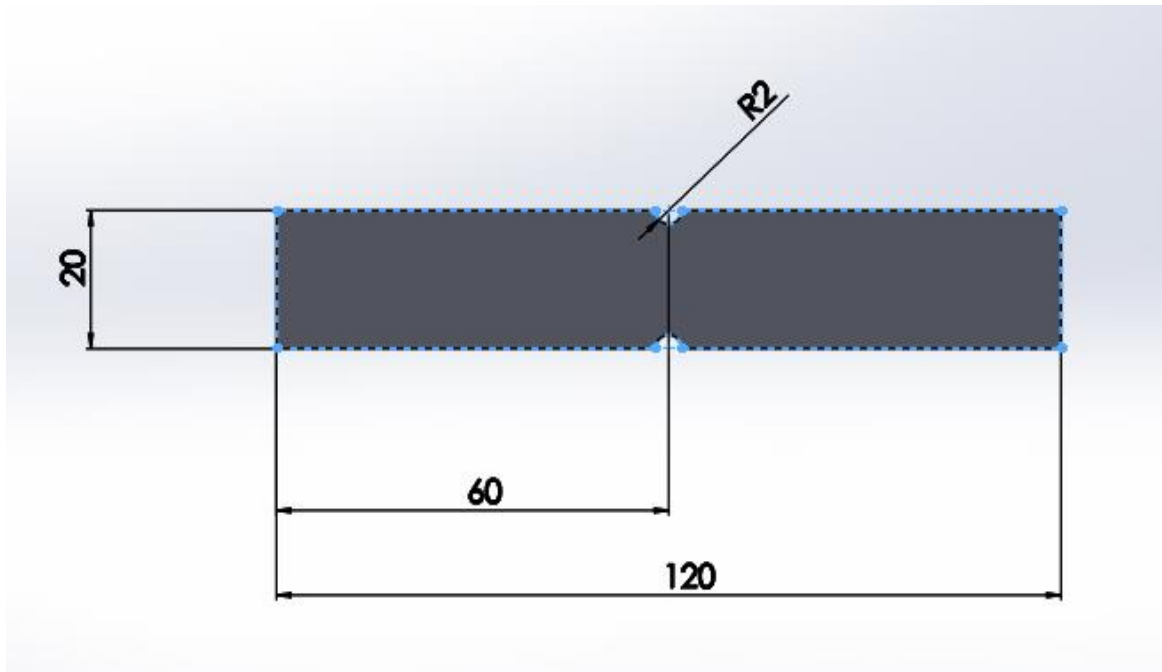


Figure II.4 Epreuve entaillée $r = 2\text{mm}$ avec dimensions.

d. Epreuve entaillée $r = 4\text{mm}$:

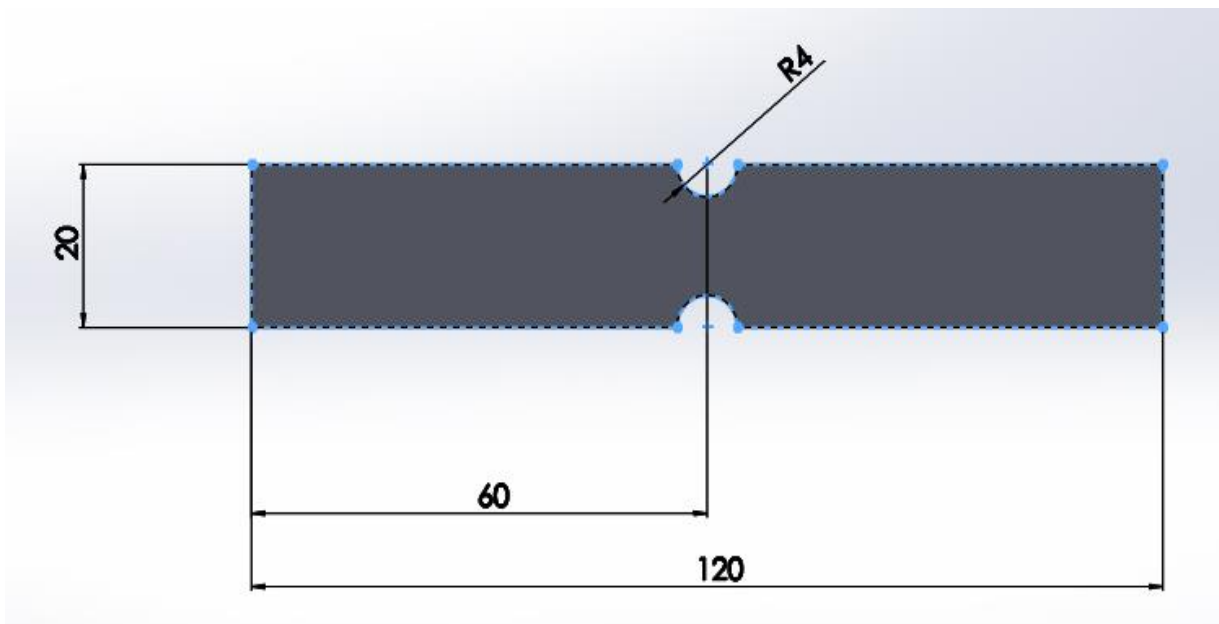


Figure II.5 Epreuve entaillée $r = 4\text{mm}$ avec dimensions.

e. Epreuve entaillée r =8mm :

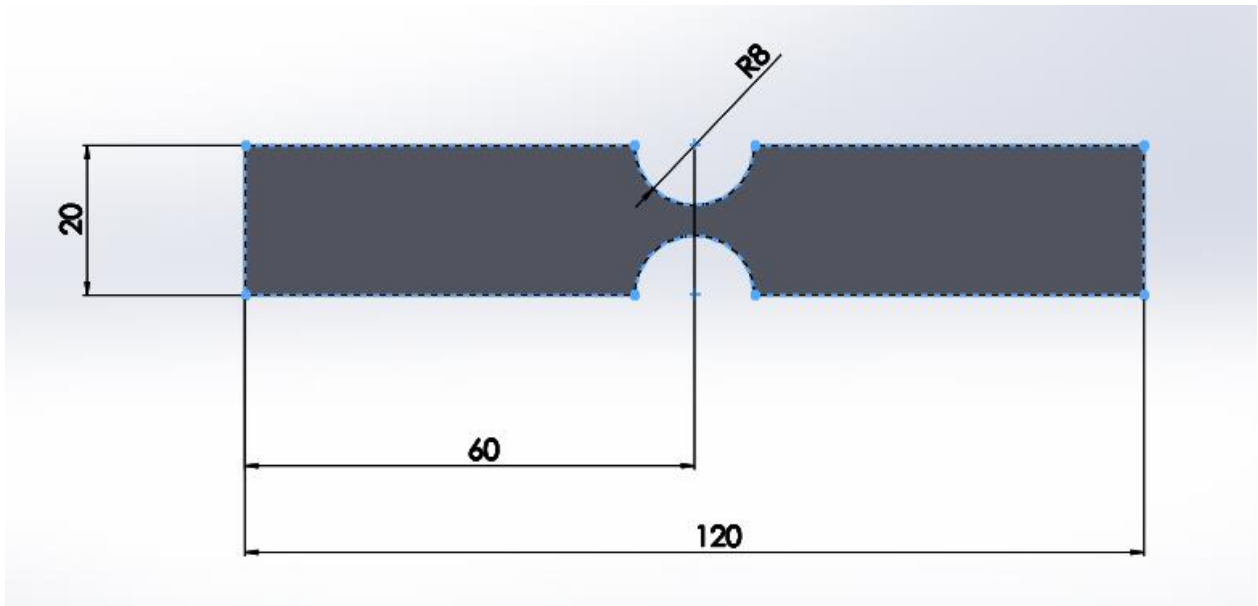


Figure II.6 Epreuve entaillée r =8mm avec dimensions.

II.3.1 Découpe des éprouvettes :

Pour découper les éprouvettes nous avons choisi le procédé de découpe au jet d'eau car il sépare les particules du matériau proches de la surface et provoque un processus de découpe sans contrainte et sans apport de chaleur. Le principe de fonctionnement est assez simple, la tôle est posée sur un support composé de lames qui finissent par être découpées. Un jet d'eau fin frappe la surface d'une pièce à grande vitesse, cela provoque un enlèvement de matière et sépare le matériau. Selon le matériau à découper, l'eau peut être mélangée à un abrasif (du sable grenat est intégré au jet d'eau). Au niveau de la tête de coupe, l'eau sort par une fine ouverture de buse avec un diamètre de jet de 0,1 à 0,5 millimètres. La puissance du jet dépend de la pression de l'eau et du diamètre de l'ouverture de la buse.

Le logiciel utilisé est le IGEMS logiciel suédois inspiré d'AutoCad est l'un des principaux logiciels de CAO/FAO, il est nécessaire pour la planification et l'estimation des coûts des travaux de découpe, il a été spécialement conçu pour les machines de découpe par jet d'eau. L'échange de données entre Solidworks et IGEMS se fait par exportation de fichier DXF, DWG, EPS. [21]



Figure II.7 Centre de découpe jet d'eau.

II.3.2 Eprouvettes obtenues :

Eprouvettes de traction selon les trois directions qui sont selon le sens du laminage 0° , 45° et 90° .

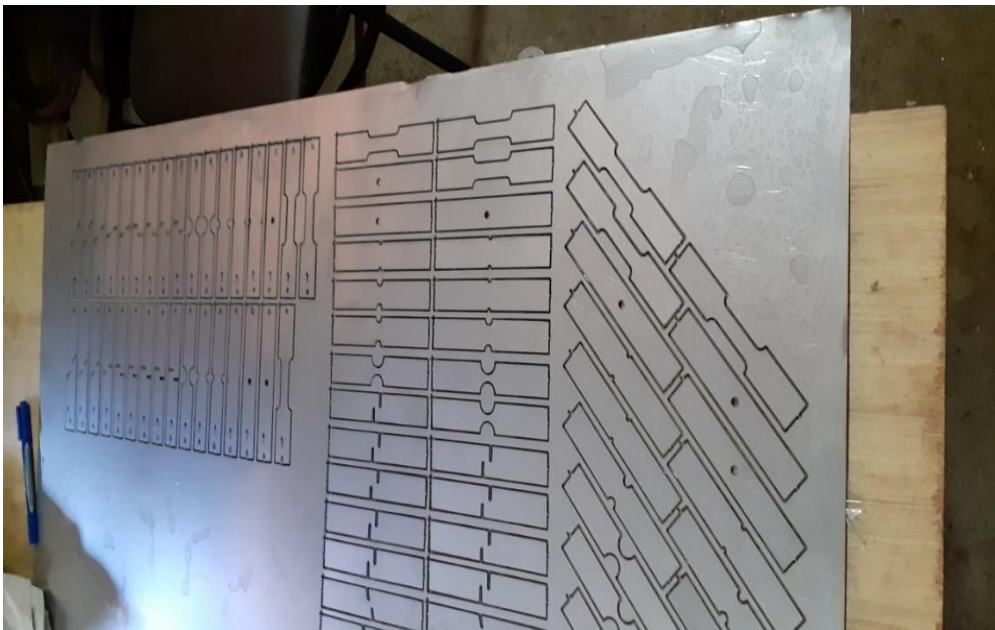


Figure II.8 Eprouvettes selon les trois directions 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de laminage.

II.3.2.1 Direction de laminage :

Les trois directions de laminage sont représentées sur la figure (II.11).

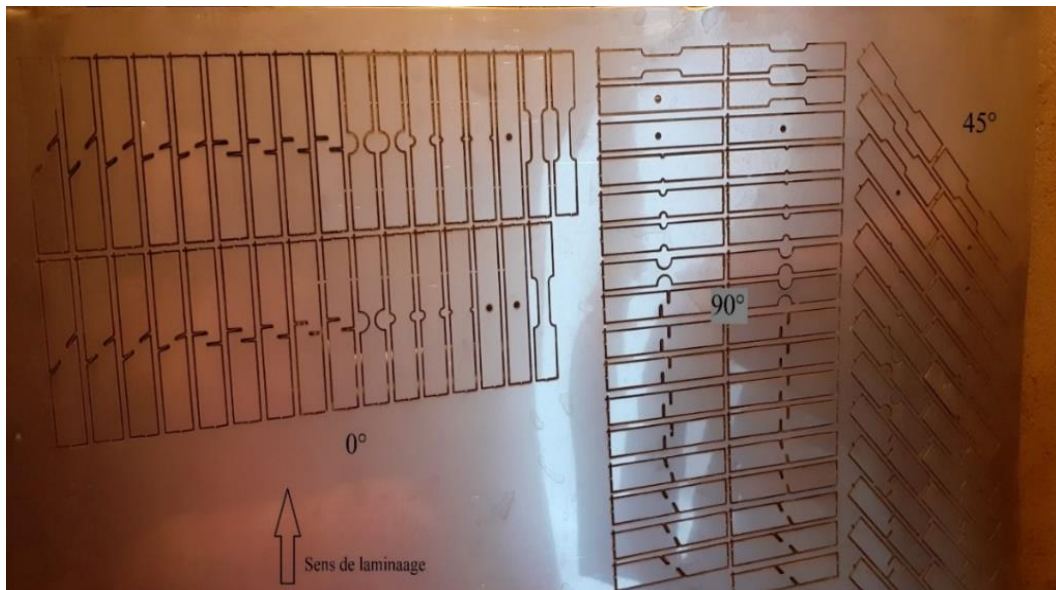


Figure II.9 Les trois directions de laminage 0°, 45° et 90°.

Remarque : Après la découpe, les éprouvettes ne sont pas détachées de la tôle voir figure (II.12), par risque de les perdre dans le bac de récupération.

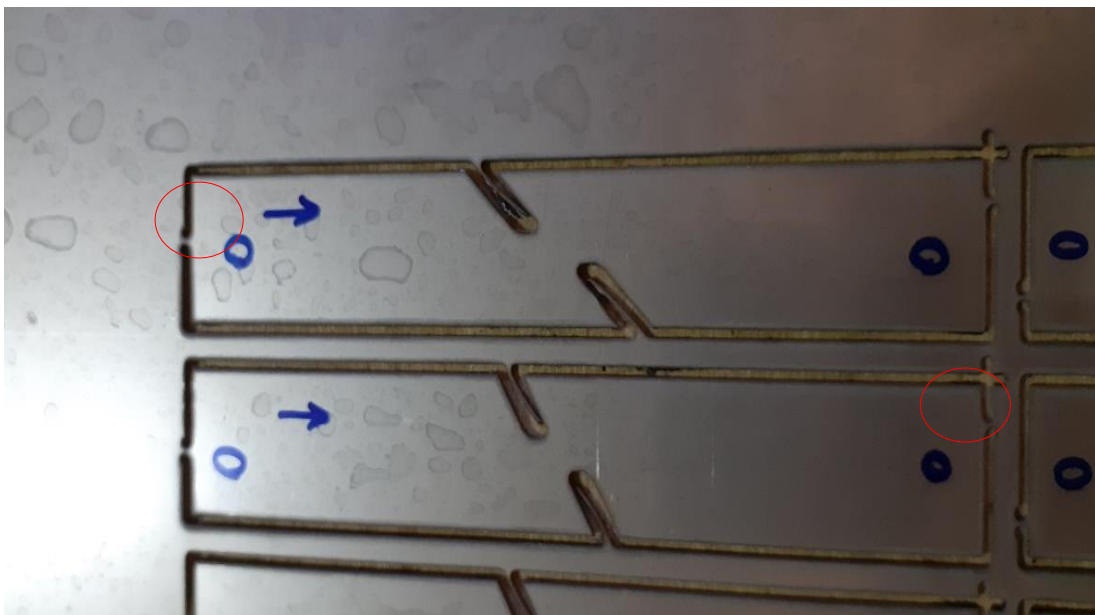


Figure II.10 Eprouvette attachée à la tôle

II.3.3 Avantages et inconvénients de la découpe au jet d'eau :

a. Avantages :

- Une précision de la coupe avec des tolérances de $\pm 0,2$ mm
- Sa puissance lui permet de couper de fortes épaisseurs (200mm).
- La découpe au jet d'eau ne génère pas de contrainte thermique (la matière ne chauffe pas, aucune contrainte mécanique).

- Elle nous évite dans beaucoup de cas une phase d'usinage.

b. Inconvénients :

- C'est une technique très lente et excessivement couteuse.
- Formation de bavures sur une seule face à la sortie du jet d'eau.

II.3.4 Ebarbage des éprouvettes :

Ebarbage des éprouvettes à l'aide d'une toile émeri grade 400 pour éliminer toutes les bavures.

Avant ébarbage :



Figure II.11 Eprouvette avant ébarbage.

Après ébarbage :



Figure II.12 Eprouvette après ébarbage.

II.4 Essai de traction :

L'essai de traction l'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux (limite d'élasticité, charge de rupture, allongement, module d'Young...). L'essai consiste à étirer un échantillon à l'aide d'une machine pour créer un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction. Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran via un système d'acquisition de données. La courbe obtenue est appelée courbe de traction. Cette courbe est constituée de 2 zones : le domaine élastique, puis, le domaine plastique. Le domaine élastique correspond à la zone où les déformations de l'échantillon sont réversibles. Le domaine plastique correspond à la zone où les déformations sont irréversibles.

II.5 La machine de traction :

Une machine de traction est constituée d'un bâti robuste à deux colonnes portant une traverse mobile. La traverse mobile est souvent entraînée par un système électromécanique à deux vis latérales lui-même entraînée par un moteur à courant continu servocontrôlé pour une application régulière et constante de la charge. La liaison entre les vis et le réducteur s'effectue en général par poulies et courroie crantée. La vitesse du mors mobile, en général constante, peut être réglée.

L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge (capteur de force et capteur d'allongement), qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette.



Figure II.13 Machine de traction.

II.6 Géométries des éprouvettes :

Les figures suivantes, représente les dimensions des éprouvettes utilisées :

a. Eprouvette de standard :

- Largeur de l'échantillon b : $b = 10 \text{ mm}$
- Longueur entre repère L_0 : $L_0 = 30 \text{ mm}$
- Longueur finale L_u : $L_u = \text{à calculer}$
- Longueur totale de l'éprouvette L_T : $L_T = 120 \text{ mm}$
- Epaisseur de l'éprouvette plate a : $a = 0,6 \text{ mm}$

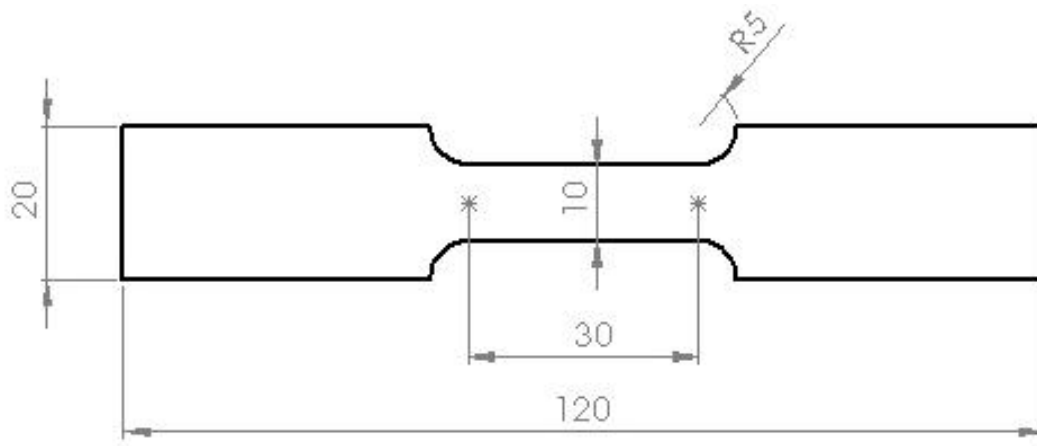


Figure II.14 Géométrie de l'éprouvette de traction.

b. Eprouvette de trouée $r = 2.5\text{mm}$:

- Largeur de l'échantillon b : $b = 15 \text{ mm}$
- Longueur entre repère L_0 : $L_0 = 30 \text{ mm}$
- Longueur finale L_u : $L_u = \text{à calculer}$
- Longueur totale de l'éprouvette L_T : $L_T = 120 \text{ mm}$
- Epaisseur de l'éprouvette plate a : $a = 0,6 \text{ mm}$

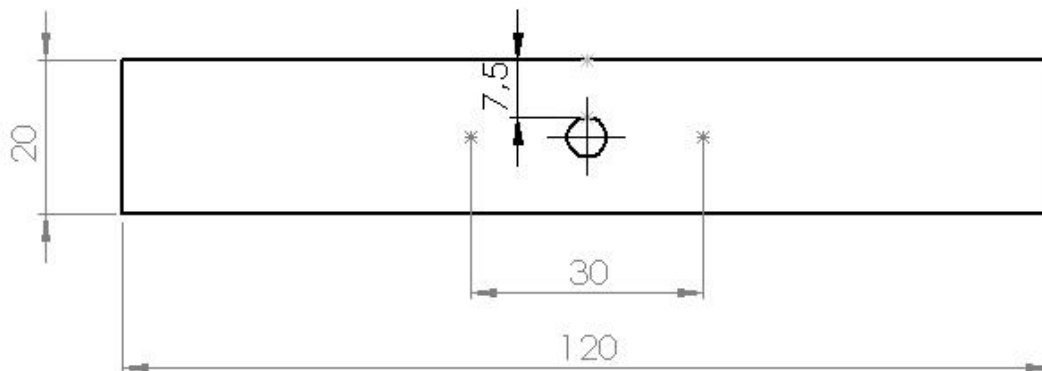
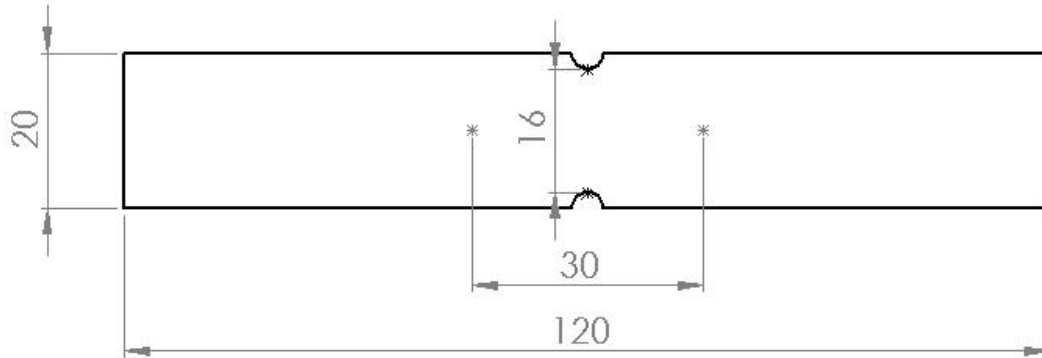


Figure II.15 Géométrie de l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$.

c. Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$:

- Largeur de l'échantillon b : $b = 16\text{ mm}$
- Longueur entre repère L_0 : $L_0 = 30\text{ mm}$
- Longueur finale L_u : $L_u = \text{à calculer}$
- Longueur totale de l'éprouvette L_T : $L_T = 120\text{ mm}$
- Epaisseur de l'éprouvette plate a : $a = 0,6\text{ mm}$



. Figure II.16 Géométrie de l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$.

d. Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$:

- Largeur de l'échantillon b : $b = 12\text{mm}$
- Longueur entre repère L_0 : $L_0 = 30\text{ mm}$
- Longueur finale L_u : $L_u = \text{à calculer}$
- Longueur totale de l'éprouvette L_T : $L_T = 120\text{ mm}$
- Epaisseur de l'éprouvette plate a : $a = 0,6\text{ mm}$

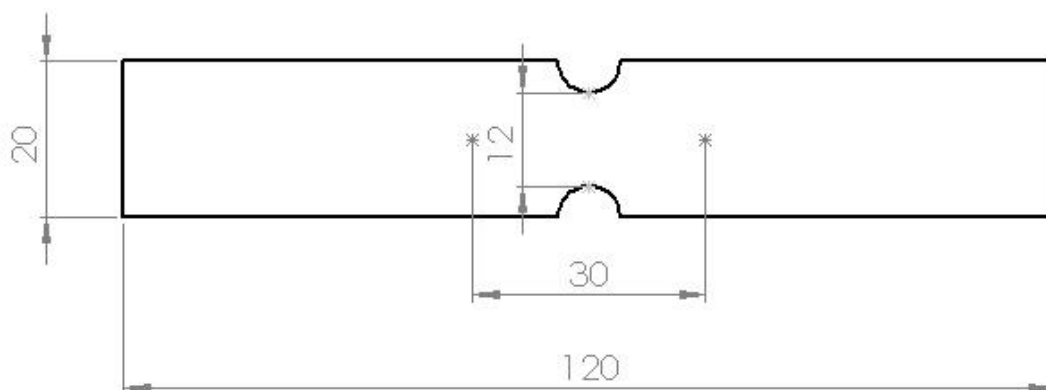


Figure II.17 Géométrie de l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$.

e. Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$:

- Largeur de l'échantillon b : $b = 4\text{mm}$
- Longueur entre repère L_0 : $L_0 = 30\text{ mm}$
- Longueur finale L_u : $L_u = \text{à calculer}$
- Longueur totale de l'éprouvette L_T : $L_T = 120\text{ mm}$
- Epaisseur de l'éprouvette plate a : $a = 0,6\text{ mm}$

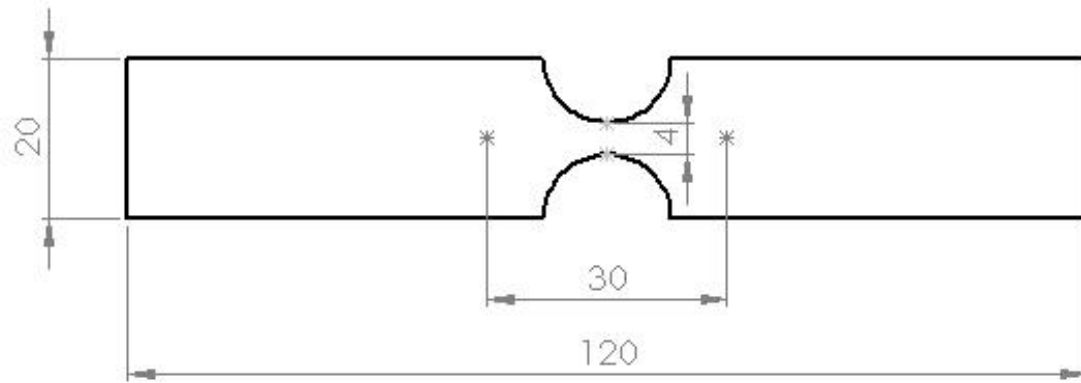


Figure II.18 Géométrie de l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$.

II.7 Caractéristique de l'essai de traction :

II.7.1 Diagramme conventionnel de traction :

Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire en fonction du taux d'allongement. La courbe conventionnelle a l'allure donnée par la figure suivante :

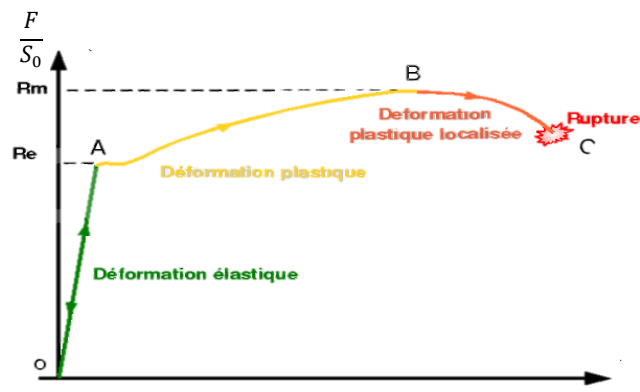


Figure II.19v Allure de la courbe conventionnelle de traction.

Cette courbe se décompose en plusieurs régions :

- OA : domaine élastique à déformation, le point A marque la limite du domaine élastique.
- AB : domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie ; le point B représente la charge maximale et le début de la striction.

- BC : domaine de striction ou de déformation plastique localisée.
- C : point de rupture de l'éprouvette. [21]

1. Limite apparente d'élasticité R_e ;

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (MPa)} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

R_e : Limite apparente d'élasticité.

F_e : Charge à la limite apparente d'élasticité (N).

S_0 : Section initiale (mm^2).

Certaines courbes de traction ne présentent pas de limite apparente d'élasticité nette (aciers austénitiques, aluminium, ...), pour cela on définit en général une limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0.2}$ (souvent fixée à 0.1% ou 0.2%).

La limite d'élasticité R_e est une valeur théorique difficilement mesurable. On exploite alors la **Rp0.2** : c'est une déformation permanente de 0.2% de l'éprouvette après le relâchement de l'effort.

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0} \text{ (MPa)} \quad \text{(III.2)}$$

2. Résistance à la traction R_m ;

Définie par :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (MPa)} \quad \text{(III.3)}$$

Avec :

R_m : Résistance à la traction (MPa).

F_m : Charge maximale (N).

S_0 : Section initiale (mm^2).

3. Allongement à la rupture $A\%$;

L'allongement à la rupture représente l'aptitude du métal à la déformation plastique,

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{S_0} \times 100 \quad \text{(III.4)}$$

L_0 : Longueur entre repère (mm)

L_u : Longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture (mm).

4. Striction :

○ Coefficient de striction :
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100. \quad (\text{III.5})$$

○ L'allongement de striction :
$$Z_u = \frac{S_0 - S_u}{S_u} \times 100. \quad (\text{III.6})$$

Avec S_u : la section minimale de l'éprouvette après la rupture.

II.7.2 Diagramme rationnel de traction :

Le diagramme rationnel porte en abscisses la déformation rationnelle et en ordonnées la contrainte vraie (qui tient compte de la variation de la section au cours de l'essai contrairement au diagramme conventionnel).

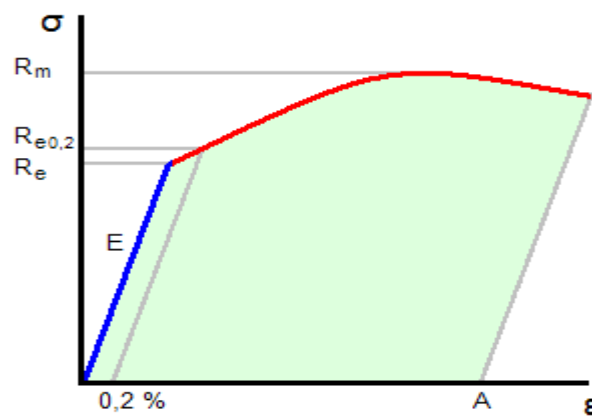


Figure II.20 Diagramme rationnel de traction.

Grandeurs caractéristiques :

1. Contrainte vraie :

Elle tient compte de la variation de section au cours de l'essai,

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ (MPa)}. \quad (\text{III.7})$$

Avec :

σ : Contrainte vraie (MPa).

F : Charge rapportée (N).

S : Section instantanée (mm^2).

2. Le module d'Young E :

Le module d'élasticité longitudinal est déduit de la loi de Hooke,

$$\sigma = E \times \epsilon \text{ (MPa)} \quad (\text{III.8})$$

3. Le coefficient de poisson ν :

Représente le retrait de l'éprouvette dans le domaine élastique,

$$\nu = \frac{(l_0 - l) / l_0}{(L - L_0) / L_0} \quad (\text{III.9})$$

4. La contrainte à la limite élastique σ_e :

C'est la contrainte maximum que peut supporter un matériau sans danger de déformation permanente.

5. La contrainte maximale σ_m ;

6. L'allongement à la rupture A ;

II.8 Résultats expérimentale :

II.8.1 Eprouvettes dédiée à l'essai :



Figure II.21 Eprouvette standard destinée à l'essai de traction.



Figure II.22 Eprouvette trouée destinée à l'essai de traction.



Figure II.23 Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.

Figure II.24 Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.Figure II.25 Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$ destinée à l'essai de traction.

II.8.2 Courbe conventionnelles :

Les résultats des essais de traction selon les trois directions (0° , 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage, sont présentés dans les tableaux suivants :

	Numéro	S_0 (mm^2)	F_{ruptur} (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	E (N/mm^2)	$R_{p0.1}$	$R_{p0.2}$
Eprouvette dans la direction 0°	01	6,00	454,94	117,63	200000,00	313,74	334,42
	02	6,00	389,95	117,96	198030,09	318,38	338,10
	03	6,00	270,89	116,47	199267,69	310,51	331,95
Eprouvette dans la direction 45°	01	6,00	228,45	107,79	188552,84	252,62	279,07
	02	6,00	504,75	111,14	186207,71	275,83	300,02
	03	6,00	452,98	106,39	199267,69	271,90	292,28
Eprouvette dans la direction 90°	01	6,00	469,25	112,16	193079,49	302,71	319,99
	02	6,00	269,12	109,35	198459,31	291,94	310,75
	03	6,00	258,41	110,36	196279,58	289,19	309,57

Tableau II.1 Valeurs numériques des caractéristiques mécaniques de l'inox 304L.

A partir des résultats des essais de traction, nous concluons les valeurs moyennes représentées dans le tableau suivant :

		S ₀ (mm ²)	F _{ruptur} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	E (N/mm ²)	R _{p0.1}	R _{p0.2}
Eprouvette dans la direction 0°		6,00	389,95	117,96	198030,09	318,38	338,10
Eprouvette dans la direction 45°		6,00	504,75	111,14	186207,71	275,83	300,02
Eprouvette dans la direction 90°		6,00	258,41	110,36	196279,58	289,19	309,57

Tableau II.2 Caractéristiques mécanique de l'inox 304L.

Les résultats expérimentaux montrent que les caractéristiques mécaniques des éprouvettes en acier inoxydable 304L sont variables pour les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport au sens de laminage. On remarque que la résistance à la rupture R_m est plus élevée selon 0°, et plus faible selon la direction 45°.

Directions	0°	45°	90°
Module d'Young	198030,09	186207,71	196279,58

Tableau II.3 Le module d'Young selon les trois directions.

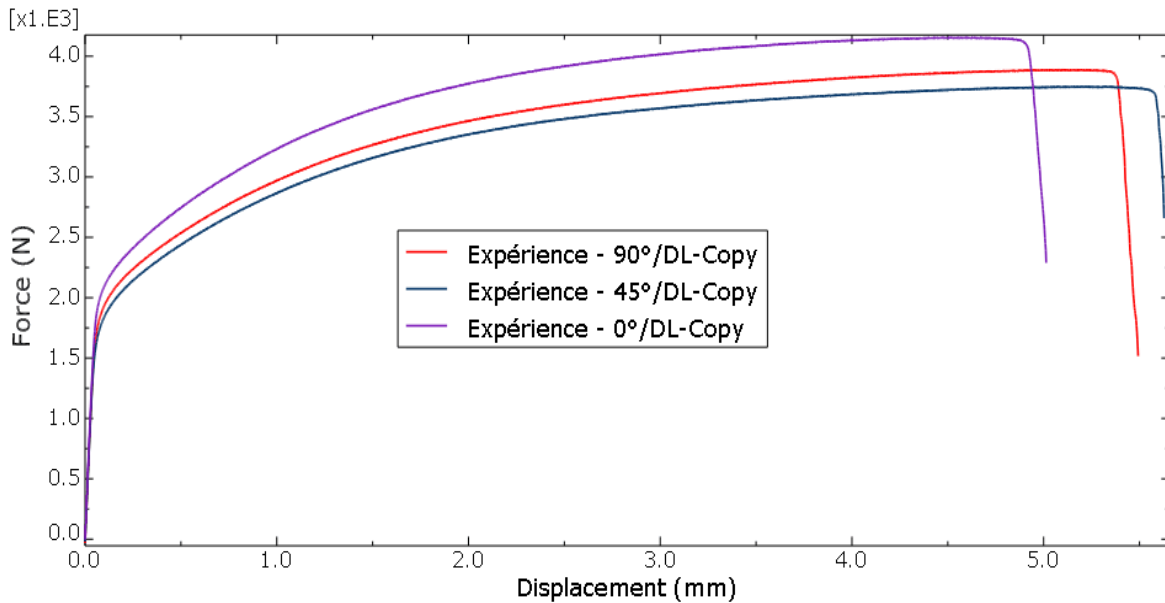


Figure II.26 Superposition des courbes de traction.

Nous remarquons que dans le domaine élastique les trois courbes se superposent, tandis que dans le domaine plastique un élargissement entre les trois courbes est observé, cet élargissement est plus important dans la direction 0° par rapport au sens de laminage. Nous expliquons cette variation par le comportement anisotrope de l’acier inoxydable 304L.

II.8.3 Courbe rationnelle :

Les résultats de calculs des caractéristiques mécaniques des courbes rationnelles sont représentés dans le tableau suivant :

	Dimension initiale avant traction			Dimension après traction dans le domaine élastique			Coefficient d'anisotropie		Anisotropie moyenne	Anisotropie planaire
	L ₀ (mm)	b ₀ (mm)	a ₀ (mm)	L (mm)	b (mm)	a (mm)	r _θ	r _θ moyen	r	Δr
Eprouvette dans la direction 0°	30	10	0,6	32,99	9,56	0,57	0,897	0,913	0,876	0,058
	30	10	0,6	32,86	9,57	0,57	0,914			
	30	10	0,6	33,02	9,55	0,57	0,928			

Eprouvette dans la direction 45°	30	10	0,6	32,96	9,57	0,57	0,848	0,847		
	30	10	0,6	32,86	9,57	0,57	0,968			
	30	10	0,6	33,36	9,56	0,56	0,725			
Eprouvette dans la direction 90°	30	10	0,6	32,86	9,57	0,57	0,905	0,897		
	30	10	0,6	32,96	9,61	0,56	0,863			
	30	10	0,6	33,05	9,55	0,57	0,923			

Tableau II.4 Les valeurs calculées des coefficients d'anisotropie.

Nous constatons que le coefficient d'anisotropie est plus important dans la direction 0° par rapport à la direction de laminage, et est plus faible pour la direction 45°.

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons expliqué le procédé de découpe au jet d'eau des tôles en acier inoxydable en passant par la conception sur solidworks, puis nous avons abordé la procédure expérimentale et les résultats obtenus par essais de traction, ces résultats nous ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

Chapitre III :

Simulation numérique et
résultats.

III Chapitre : Simulation numériques et résultats.

III.1 Introduction :

Cette partie rassemble une recherche bibliographique sur le code de calcul par éléments finis ABAQUS sur les aciers plus précisément l'acier inoxydable 304 L. Le logiciel ABAQUS permet de réaliser des simulations du comportement de pièces ou de structures en prenant en compte des grandes déformations ou des non-linéarités. Il est donc possible de réaliser des analyses en statique ou en dynamique.

III.1.1 Historique :

Les bases théoriques de la méthode des éléments finis (M.E.F) reposent d'une part sur la formulation énergétique de la mécanique des structures et d'autre part sur les méthodes d'approximations. La M.E.F (Méthode des éléments finis) est mise au point en 1953 chez Boeing (Seattle, USA, calcul des structures d'ailes d'avion) ; On y développe le premier élément fini, sa matrice de rigidité, l'assemblage et la résolution par la méthode des déplacements (publié par Turner, Clough, Martin et Top en 1956). Quant aux bases théoriques générales, alliant l'analyse des structures en barres et poutres avec celle des solides, elles sont étudiées de 1954 à 1960 (Argyris, Kelsey). Certaines idées apparurent auparavant, en particulier chez les mathématiciens pour résoudre divers problèmes aux limites par exemple celui de la torsion de Saint Venant en divisant la section en triangles, mais elles restèrent sans suite.

L'expression élément fini a été inventée par Slough en 1960. Années 60, la M.E.F s'attaque à tous les domaines du calcul de structures. On trouve, la M.E.F, principalement dans le domaine de la mécanique des solides et des structures. Elle a été conçue pour être exécutée sur de gros ordinateurs tels que : ABAQUS, SAP, CATIA. La crédibilité des résultats obtenus va permettre l'utilisation de la méthode des éléments finis par des entreprises et des bureaux d'études de taille réduite. C'est évidemment l'apparition d'ordinateurs puissants qui a permis le développement de la simulation numérique. Le rythme d'évolution de l'informatique est actuellement gigantesque et les possibilités d'application augmentent sans cesse. [22]

III.1.2 Définitions de la méthode des éléments finis :

De manière générale, la méthode des éléments finis tire une grande partie de sa popularité de son potentiel d'application à un très grand nombre de problèmes pratiques rencontrés par les ingénieurs. En effet, cette méthode s'applique à tout problème physique qui peut être modélisé mathématiquement par un ensemble d'équations différentielles assorti d'un ensemble de conditions de frontières (ou conditions aux limites) et d'un ensemble de conditions initiales pour les problèmes non-stationnaires. Ainsi, la MEF s'applique aussi bien pour des problèmes d'élasticité, que pour des problèmes de transfert de chaleur, d'électromagnétisme et d'écoulement de fluides. Un problème physique modélisé mathématiquement peut être résolu en utilisant des approches analytiques méthodes de calcul manuelles par opposition aux méthodes de calcul numériques qui elles sont destinées à être implantées sur ordinateur. Les

méthodes analytiques sont basées, la plupart du temps, sur des hypothèses simplificatrices qui ne permettent pas de simuler le comportement d'un système réel de manière précise.

Les méthodes numériques ont connu un développement très important ces dernières années, en grande partie grâce au développement des technologies informatiques. Ces méthodes restent des méthodes approchées de résolution des problèmes physiques rencontrés par l'ingénieur mais elles permettent de simuler et solutionner beaucoup plus précisément ces problèmes. Elles impliquent des calculs très lourds, impossibles à réaliser manuellement et le développement de l'outil informatique permet maintenant de retrouver ce type de technologie même sur plateforme PC.

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis est de transformer un problème continu modélisé mathématiquement par un système d'équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites, en un problème discret qui est modélisé mathématiquement par un système d'équations linéaires. La solution d'un problème continu est un champ continu d'une grandeur physique (par exemple les déplacements en mécanique), alors que la solution d'un problème discret est un ensemble de valeurs prises par une grandeur physique en des points particuliers, appelés nœuds dans le cadre de la MEF. En mécanique, la MEF permet lorsqu'elle est utilisée de manière éclairée de dimensionner ou de calculer la résistance mécanique des pièces, assemblages et structures de manière très précise. [23]

La méthode des éléments finis se met en deux étapes ; dans la première, le domaine géométrique est subdivisé en sous domaines de géométrie simple, appelés éléments, ces éléments sont connectés aux nœuds où la continuité des champs de déplacement est assurée sur lesquels l'étude du problème peut se faire en une seule opération. Dans la seconde, les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations algébriques à l'aide du calcul vibrationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme celle des résidus pondérés. La solution finale s'obtient en résolvant un système d'équations global formé assemblant les équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine. Ces étapes se font de nos jours grâce à des logiciels de calcul tel que le logiciel ABAQUS.6.2019.

III.1.3 Modélisation et discrétisation :

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème, il faut effectuer deux opérations essentielles la modélisation et la discrétisation, ces opérations se font en deux temps.

- La modélisation.
- La discrétisation ensuite et portent sur les deux aspects principaux du problème pratique ;

- Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites.

- Choix des éléments finis et du maillage. [24]

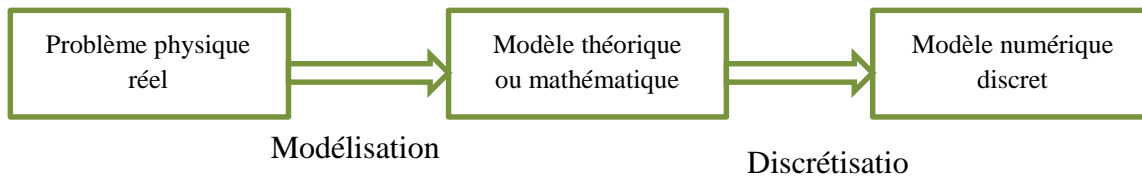


Figure III.1 Etape de l'analyse par M.E.F.

III.1.4 ABAQUS :

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

Le progiciel ABAQUS se compose de trois produits :

ABAQUS / Standard : il s'agit d'un solveur généraliste. Celui-ci recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite ;

ABAQUS / Explicit : ce dernier emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre les problèmes dynamiques ou quasi statiques non-linéaires ;

ABAQUS / CAE : ce produit constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramètres. La gestion de l'interface graphique est assurée par fox-toolki. ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. En 2005, ABAQUS, Inc a été acquis par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". A partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe. inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier. odb (ou post traitement). La

structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, les matériaux, les chargements, etc...., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré-traitement et le post-traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats.

Le Module ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation ;

1-Le module « PART » : Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers SOLIDWORKS par exemple.

2-Le module « PROPERTY » : Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

3-Le module « ASSEMBLY » : Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

4-Le module « STEP » : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post-traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

5-Le module « INTERACTION » : Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

6-Le module « LOAD » : Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

7-Le module « MESH » : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

8-Le module « JOB » : Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

9-Le module « VISUALIZATION » : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

10-Le module « SKETCH » : Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple. [25]

III.2 Simulation numérique :

Nous allons étudier trois éprouvettes de traction selon trois direction (0° , 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage en acier inoxydable 304L, soumis à une traction sur l'axe X. Les résultats numériques obtenus seront comparés à des résultats expérimentaux.

III.2.1 Conditions aux limites :

On a imposé le même déplacement pour toutes les éprouvettes, un déplacement de 25 mm correspondant à l'expérimental sur la face gauche des éprouvettes suivant l'axe X, et un encastrement sur la face droite des éprouvettes comme le montre les figures suivantes :

III.2.2 Maillage des modèles :

Afin d'obtenir un meilleur maillage on a effectué plusieurs simulations de traction en changeant le nombre d'éléments jusqu'à obtention d'une courbe similaire à celle de l'expérimentale. Nous avons affiné le maillage sur la zone utile afin de capter correctement la solution.

Le maillage adapté sur l'éprouvette est de type quadratique à huit nœuds de type C3D8R avec intégration réduite, brique à huit nœuds et trois couches d'éléments dans l'épaisseur.

III.2.3 Epreuves :

a. Epreuve de standard :

1. conditions aux limites :

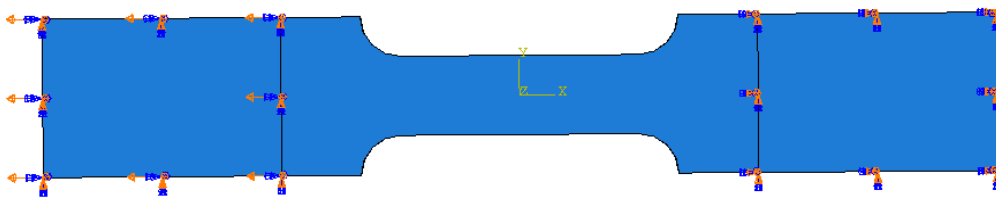


Figure III.2 Conditions aux limites de l'éprouvette de traction.

2.1 Maillage :

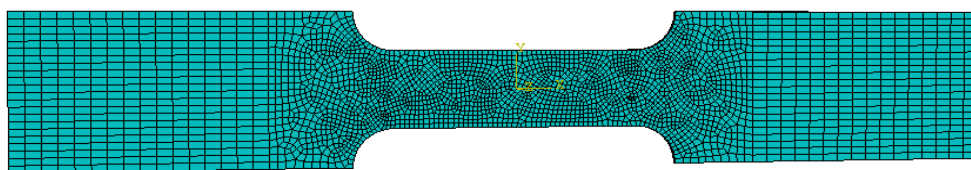
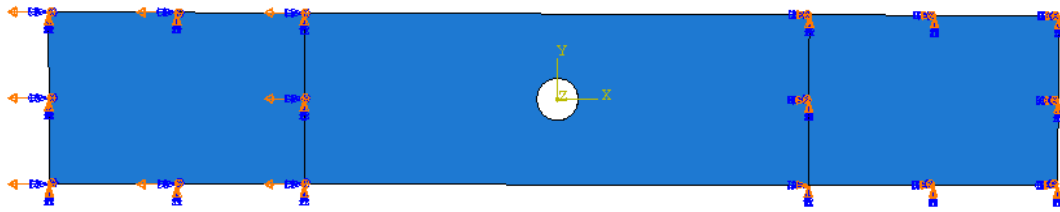
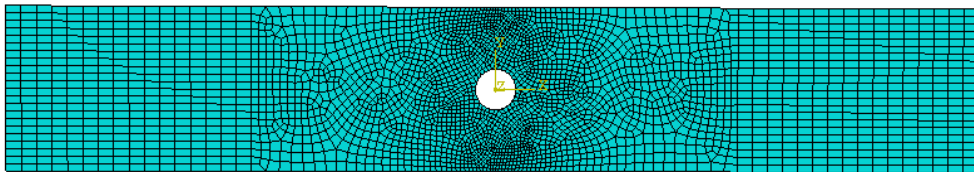
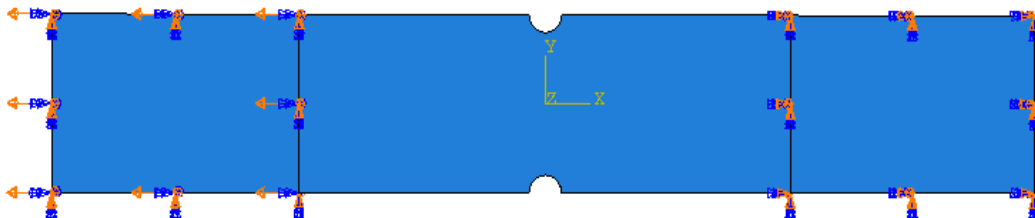
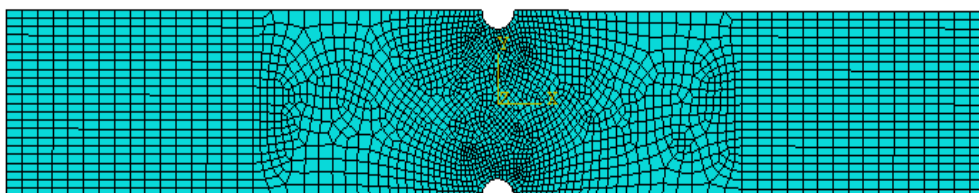
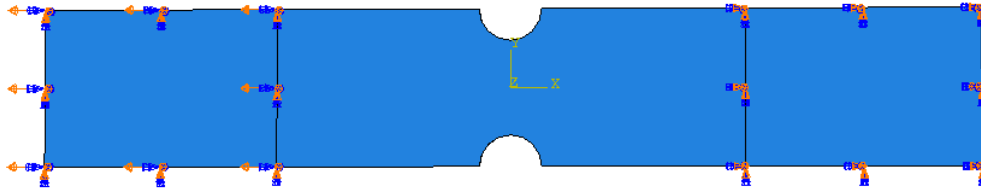
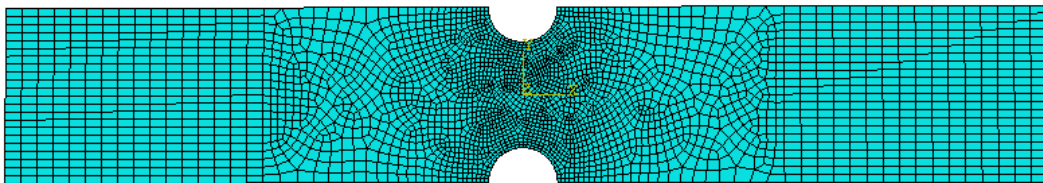
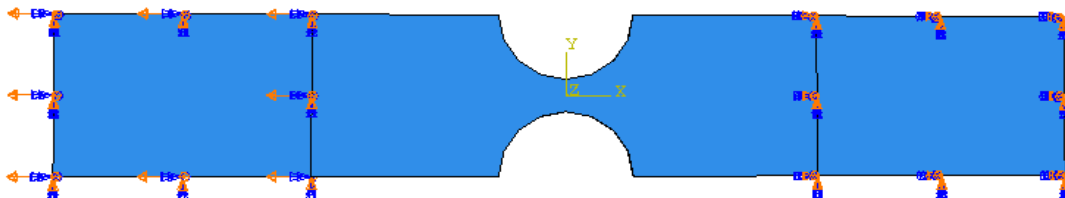
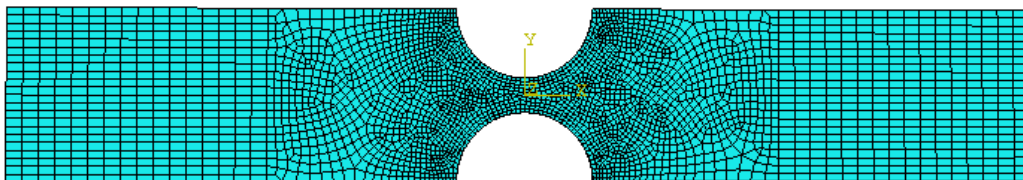


Figure III.3 Maillage de l'éprouvette de traction.

b. Eprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$:**1. Conditions aux limites :**Figure III.4 Conditions aux limites de l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$.**2. Maillage :**Figure III.5 Maillage de l'éprouvette trouée $r = 2.5\text{mm}$.**c. Eprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$:****1. Conditions aux limites :**Figure III.6 Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$.**2. Maillage :**Figure III.7 Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 2\text{mm}$.

d. Eprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$:**1. Conditions aux limites :**Figure III.8 Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$.**2. Maillage :**Figure III.9 Maillage de l'éprouvette entaillée $r = 4\text{mm}$.**e. Eprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$:****1. Conditions aux limites :**Figure III.10 Conditions aux limites de l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$.**2. Maillage :**Figure III.11 Maillage de l'éprouvette entaillée $r = 8\text{mm}$.

III.2.4 Calibrage du modèle :

Le modèle contient plusieurs paramètres à déterminer dépendant du matériau de l'étude, nous calibrons ces paramètres en tenant compte de la courbe expérimentale. Le tableau ci-dessous représente les paramètres utilisés pour calibrer le modèle.

Module d'Young E		200000 MPa
Coefficient de Poisson ν		0.44
Coefficient de Hill	F	0,532
	G	0,522
	H	0,477
	L	3
	M	3
	N	1,459

Tableau III.1 Calibrage du modèle.

III.3 Résultat de la simulation :

III.3.1 Eprouvette de standard :

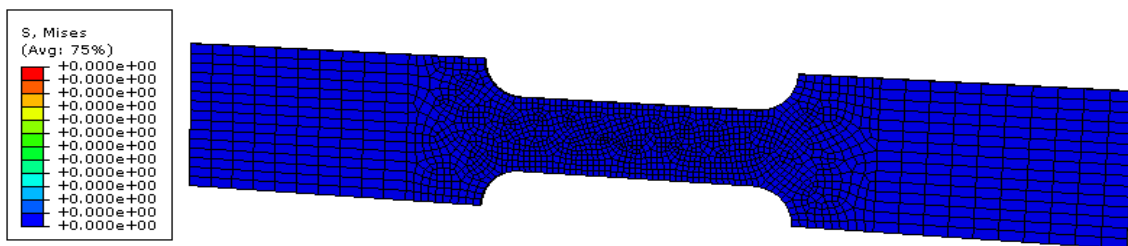


Figure III.12 Eprouvette de traction sans chargement.

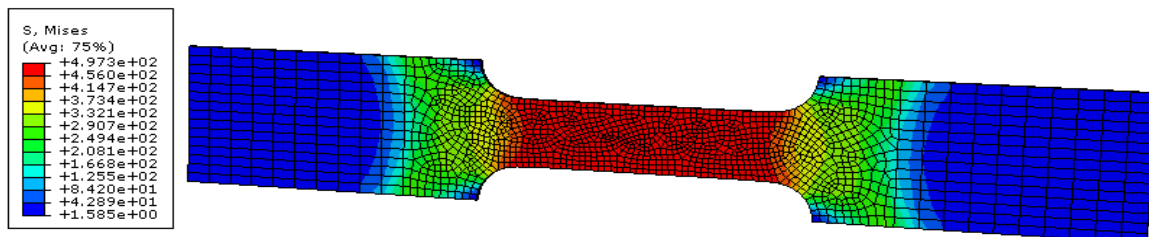


Figure III.13 Eprouvette de traction avec chargement.

Les figures ci-dessous représentent les courbes force déplacement pour les résultats numériques et expérimentaux dans les trois directions (0° , 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage :

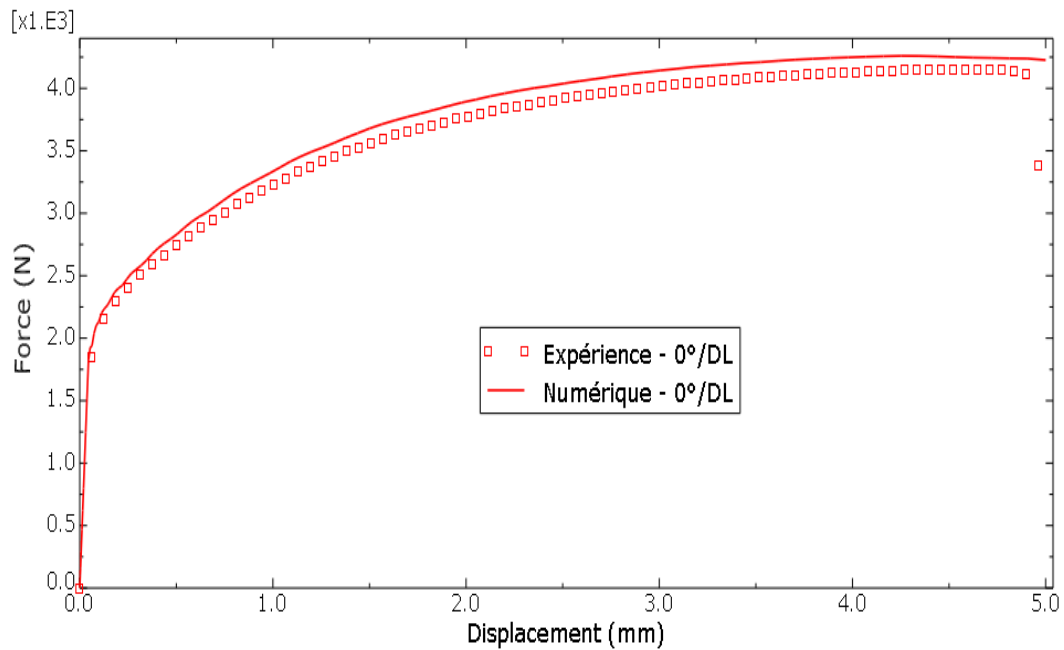


Figure III.14. superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 0° .

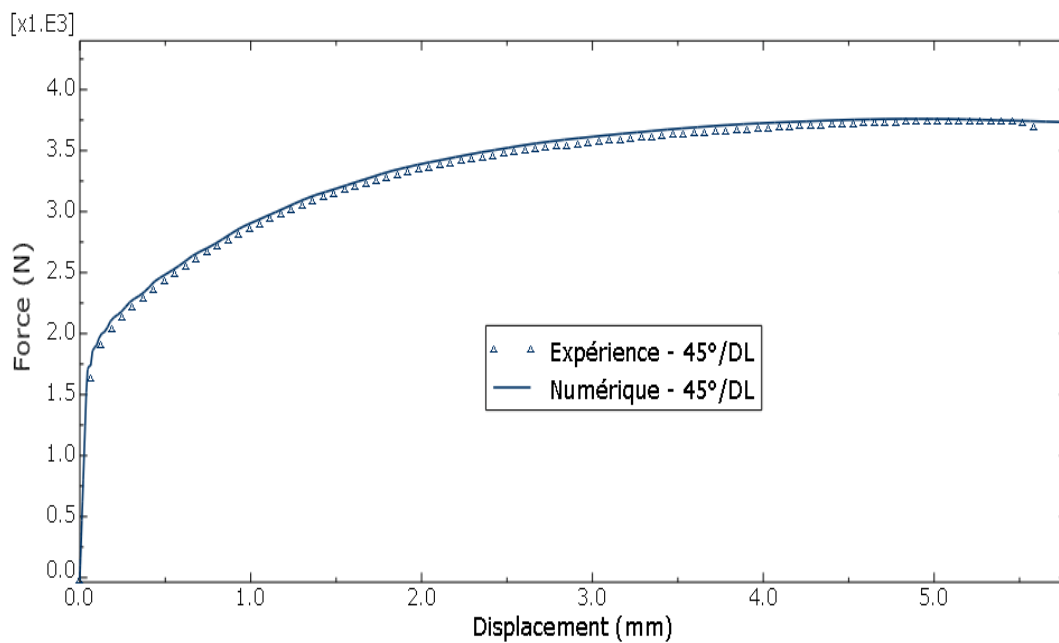


Figure III.15 Superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 45° .

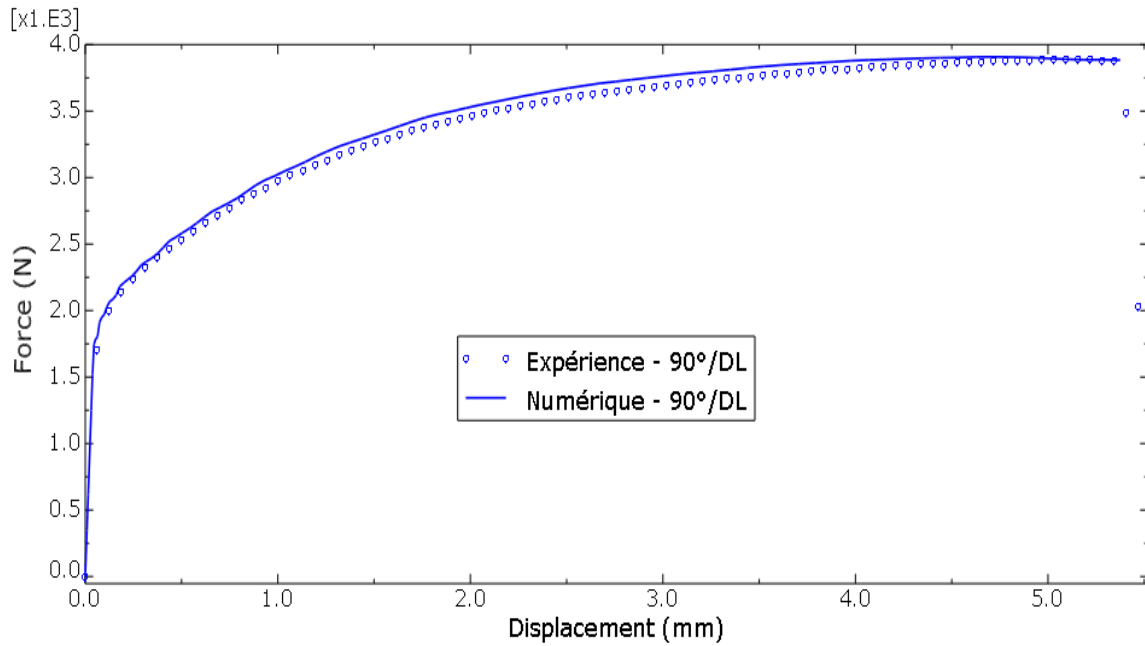


Figure III.16 Superposition de la courbe expérimentale et la courbe numérique à 90°.

III.3.2 Comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes de simulation :

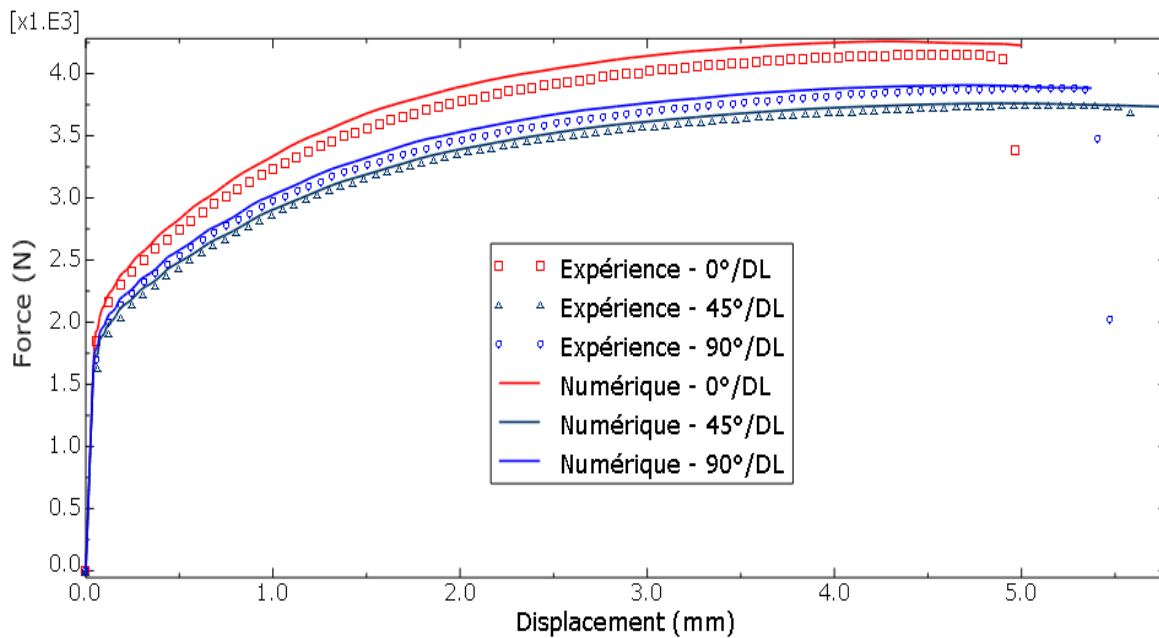


Figure III.17 Superposition des courbes expérimentales et des courbes numériques.

On remarque sur la (figure III.16) que les courbes numériques (force-déplacement) reproduisent correctement les résultats expérimentaux.

III.3.3 Epreuve trouée r = 2.5mm :

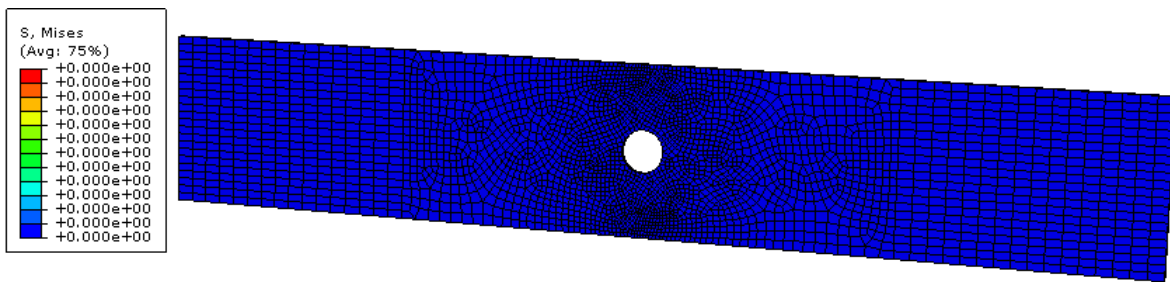


Figure III.18 Epreuve de trouée sans chargement.

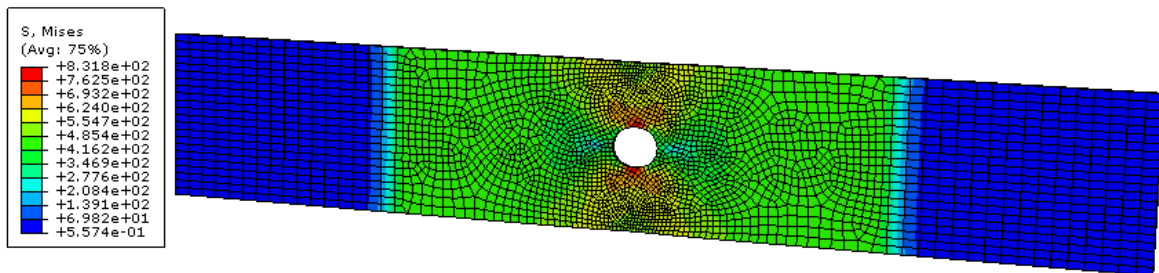


Figure III.19 Epreuve de trouée avec chargement.

La figure ci-dessous représente les courbes force déplacement pour les résultats numériques pour l'épreuve trouée dans les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage :

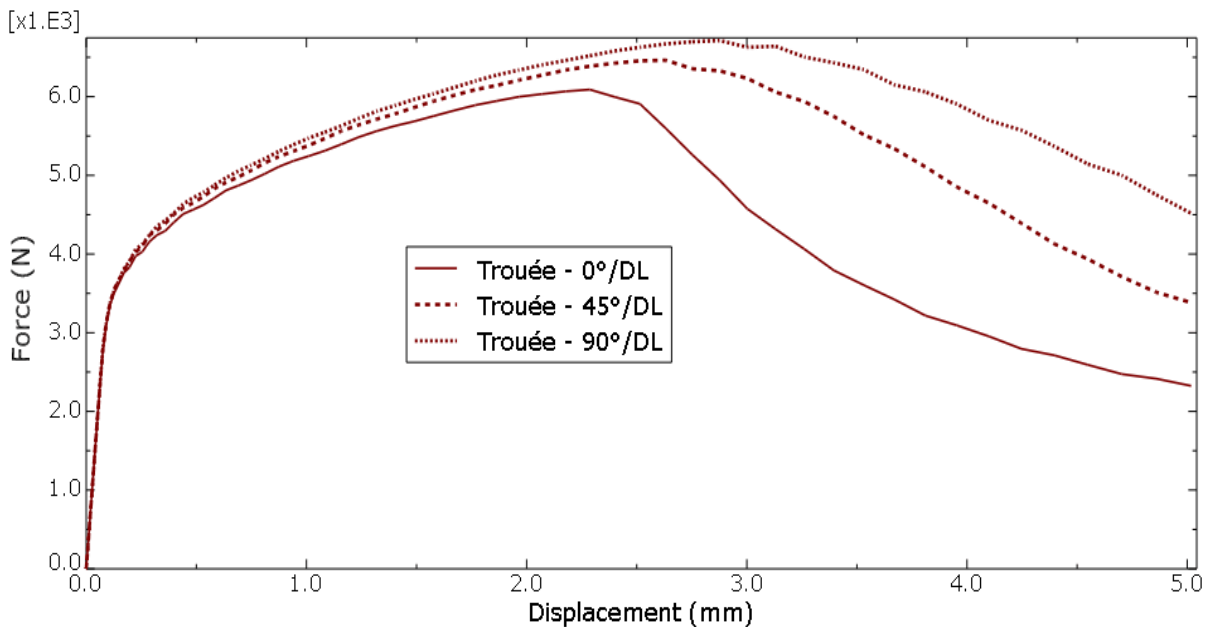


Figure III.20 Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0°, 45°, 90°) pour l'épreuve trouée r = 2.5mm.

III.3.4 Epreuve entaillée r = 2mm :

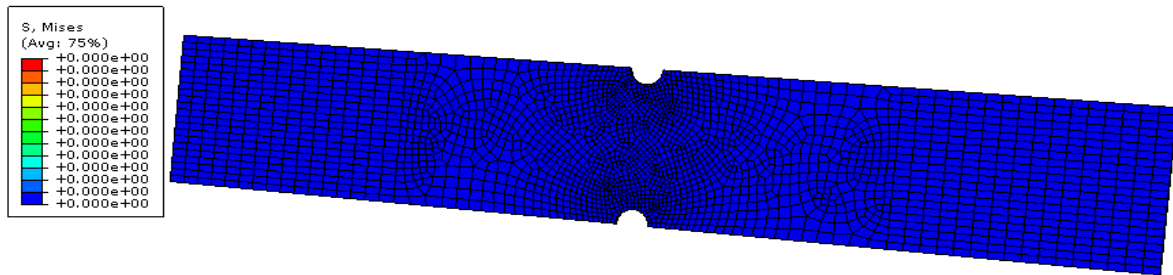


Figure III.21 Epreuve entaillée r = 2mm sans chargement.

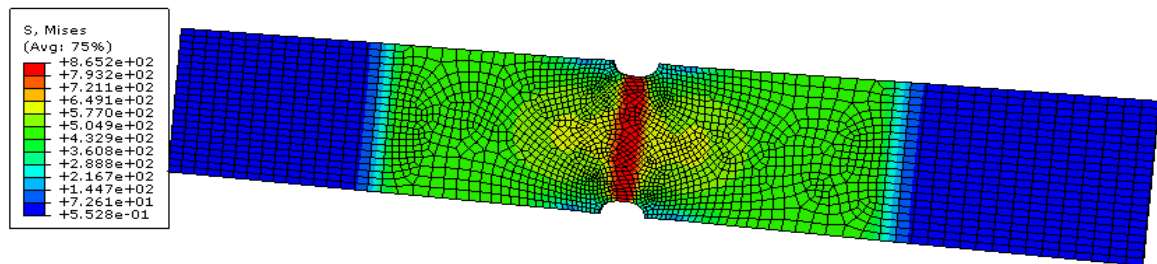


Figure III.22 Epreuve entaillée r = 2mm avec chargement.

La figure ci-dessous représente les courbes force déplacement pour les résultats numériques pour l'épreuve entaillée r = 2mm dans les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage :

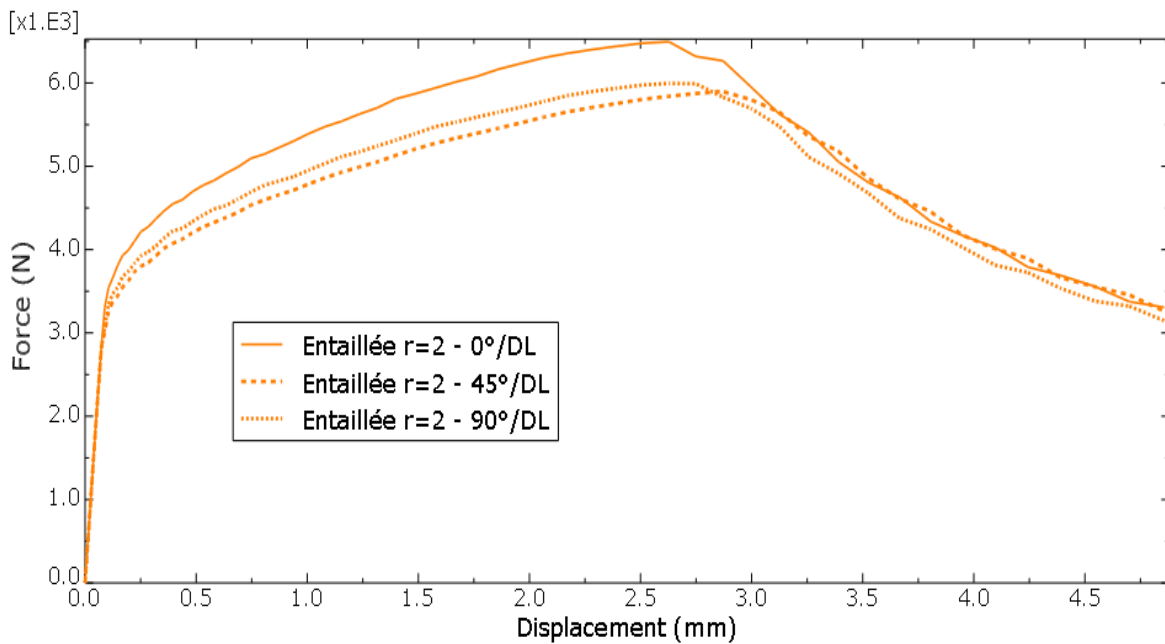


Figure III.23 Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0°, 45°, 90°) pour l'épreuve entaillée r = 2mm.

III.3.5 Epreuve entaillée r = 4mm :

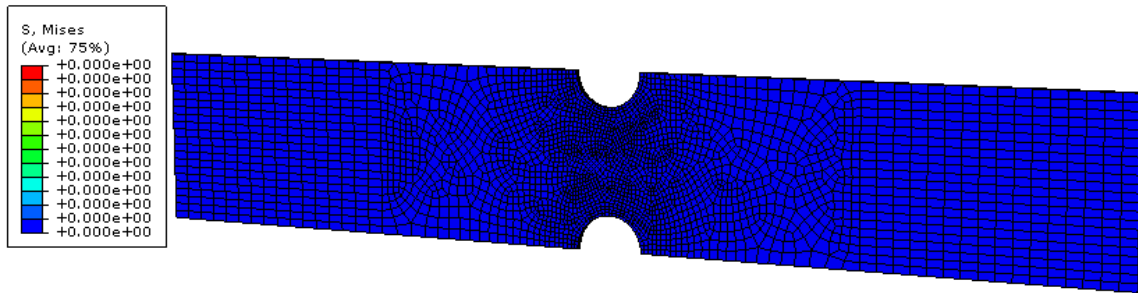


Figure III.24 Epreuve entaillée r = 4mm sans chargement.

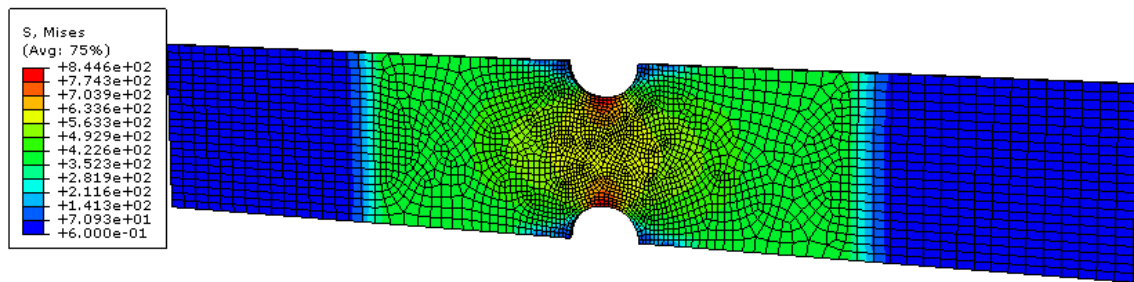


Figure III.25 Epreuve entaillée r = 4mm avec chargement.

La figure ci-dessous représente les courbes force déplacement pour les résultats numériques pour l'éprouvette entaillée r=4mm dans les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage :

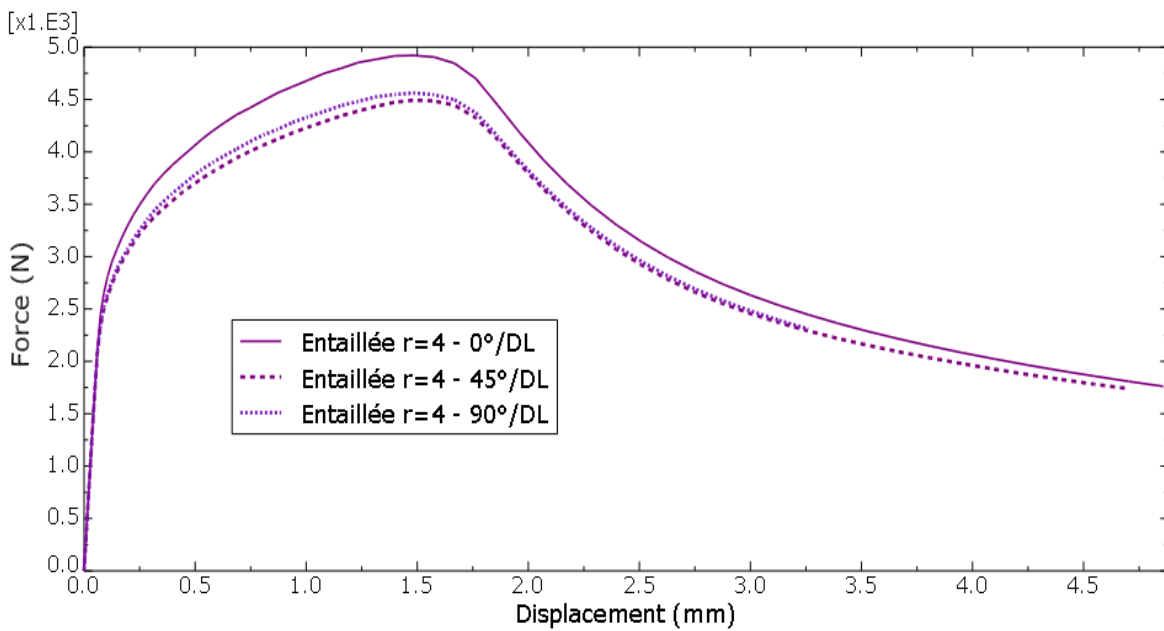


Figure III.26 Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0°, 45°, 90°) pour l'éprouvette entaillée r =4mm

III.3.6 Epreuve entaillée r = 8mm :

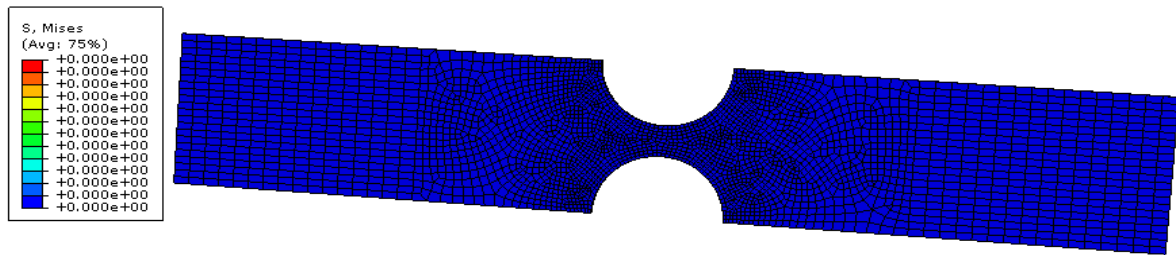


Figure III.27 Epreuve entaillée r = 8mm sans chargement.

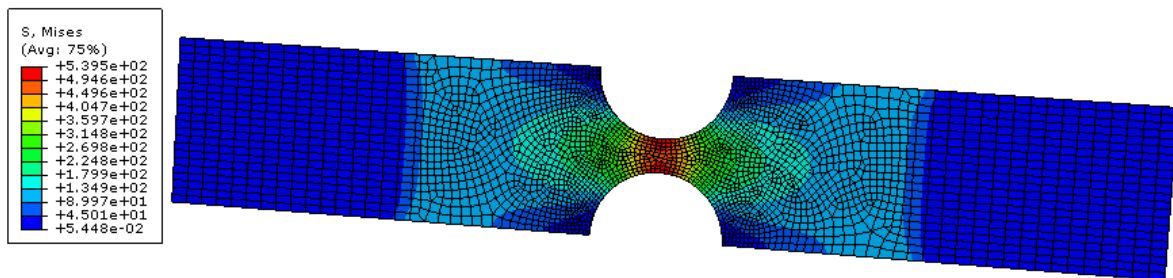


Figure III.28 Epreuve entaillée r = 8mm avec chargement.

La figure ci-dessous représente les courbes force déplacement pour les résultats numériques pour l'éprouvette entaillée r = 8mm dans les trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage :

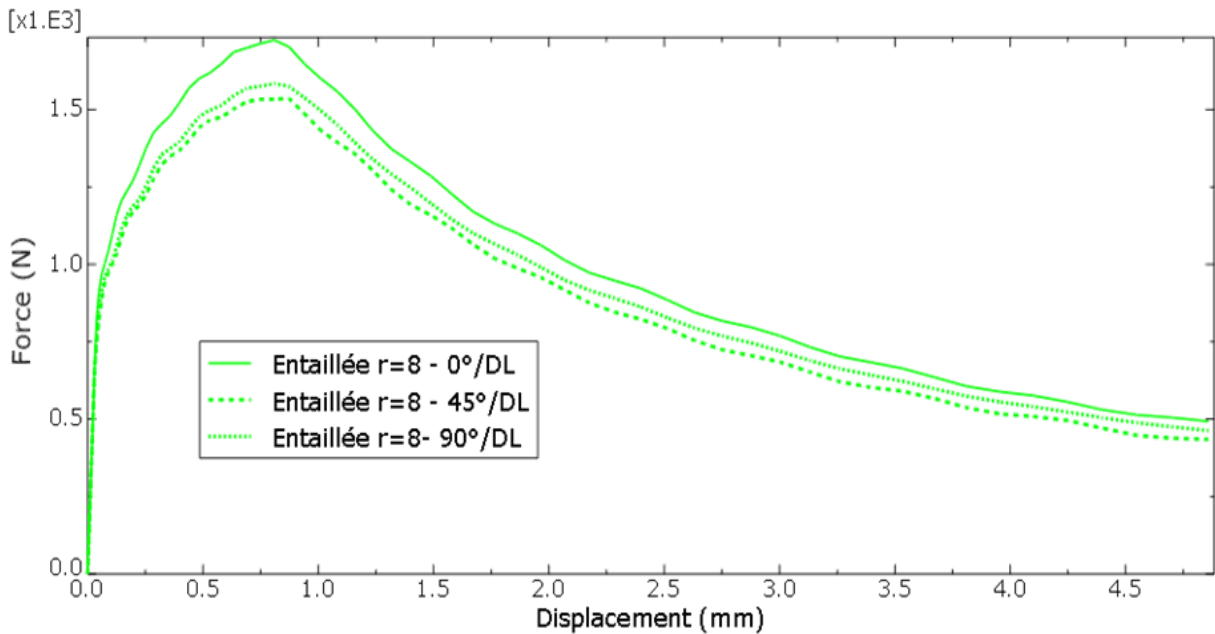


Figure III.29 Superposition des courbes numériques dans les trois directions (0°, 45°, 90°) pour l'éprouvette entaillée r = 8mm.

On constate sur les figures (19, 22, 25,28) que dans le domaine élastique les trois courbes se superposent, tandis que dans le domaine plastique un élargissement entre les trois courbes est observé, cet élargissement est plus important dans la direction 0° par rapport au sens de laminage que dans les autres directions. Nous expliquons cette variation par le comportement anisotrope de la tôle en acier inoxydable 304L.

III.4 Courbes force/Déplacement à 0° :

La figure suivante représente la superposition des courbes numériques des éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 0° par rapport à la direction de laminage :

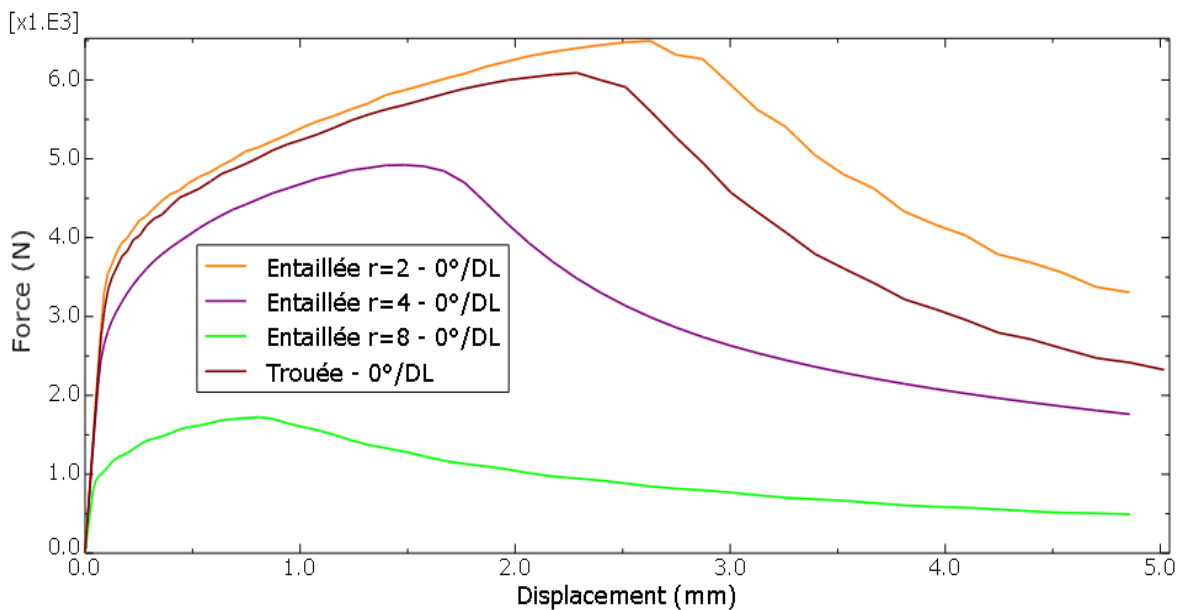


Figure III.30 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 0°

III.5 Courbes force/Déplacement à 45° :

La figure suivante représente la superposition des courbes numériques des éprouvettes (trouée, entaillée $r = 2, 4, 8\text{mm}$) dans la direction 45° par rapport à la direction de laminage :

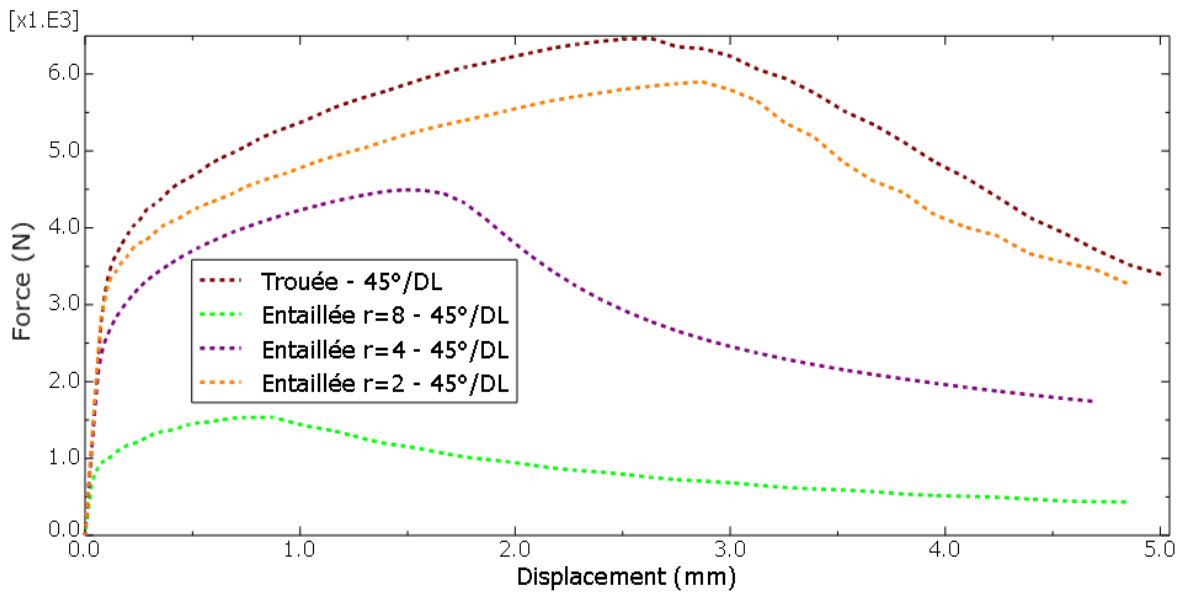


Figure III.31 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée r = 2, 4, 8mm) dans la direction 45°.

III.6 Courbes force/Déplacement à 90° :

La figure suivante représente la superposition des courbes numériques des éprouvettes (trouée, entaillée r = 2, 4, 8mm) dans la direction 90° par rapport à la direction de laminage :

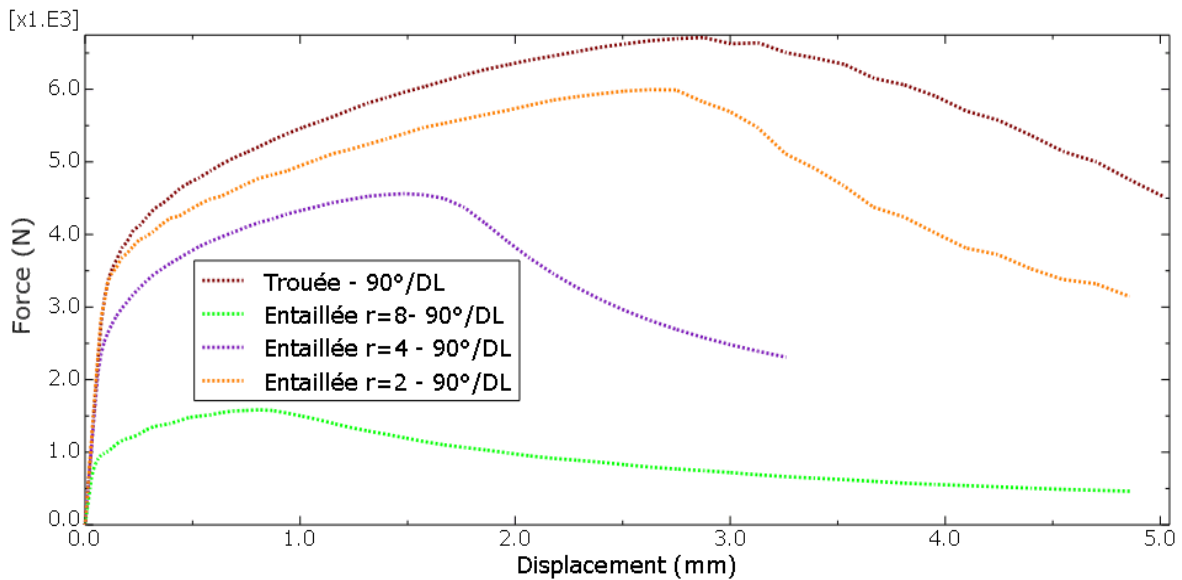


Figure III.32 Superposition des courbes numériques pour éprouvettes (trouée, entaillée r = 2, 4, 8mm) dans la direction 90°.

La comparaison des courbes dans la même direction, obtenues par simulation des éprouvettes standards avec les éprouvettes contenant un concentrateur de contrainte (trouée, entaillée r = 2,

4, 8mm), montre que la partie élastique est pratiquement la même avec un module d'Young pratiquement identique et des limites élastiques différentes.

On remarque aussi que la valeur R_m des éprouvettes standards est supérieure à celles des éprouvettes avec un concentrateur de contrainte. Cela est dû à la réduction de section de rupture.

On constate aussi que le point de rupture s'éloigne au fur et à mesure que la section de rupture augmente. Les concentrateurs de contraintes ont tendance à accélérer la rupture.

III.7 Conclusion :

Le calibrage que nous avons présenté au début, nous a permis de déterminer les paramètres du matériau des modèles. Les valeurs déterminées sont ensuite utilisées pour la simulation numérique. Les résultats des simulations numériques présentés au cours de ce chapitre sont très proches de l'expérimentale.

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire a permis de mesurer l'importance de la simulation numérique. Cependant, il est nécessaire de passer par une caractérisation du matériau étudié moyennant des essais mécaniques judicieusement choisis. En effet, l'identification des propriétés du matériau permet de montrer l'influence de certains paramètres sur la réponse du matériau. De plus, la comparaison des résultats numériques à expérimentaux permet de comprendre les phénomènes mis en jeu.

Le but principal de ce travail est de limiter les études expérimentales coûteuses au profit des modèles numériques. Ces modèles numériques permettent à la fois de simuler des essais mécaniques et de mieux comprendre les phénomènes intervenant au cours de ces opérations. La comparaison entre les prédictions numériques avec les résultats expérimentaux ont permis de montrer et d'analyser l'influence de :

- L'anisotropie du matériau,
- L'effet des entailles et concentrateurs de contrainte.

Le modèle simulé dans notre travail nous donne de bonnes indications sur le comportement mécanique du matériau, mais ne prédit pas la rupture du matériau. Cela suggère à l'avenir une étude adéquate pour prendre en compte l'endommagement afin d'améliorer les prédictions numériques.

Reference bibliographique

- [1] **Guy MURRY**, «Généralités sur les aciers», technique d'ingénierie, M 300.
- [2] **Bensaada.S**, «Désignation des aciers», Magister, Université de Biskra. Novembre 2019.
- [3] **Document Internet** « Technique sur acier inoxydable » Consulté le 17 mai 2022 sur le site www.bene-inox.com
- [4] **C. Pierre-Jean**, «Acier inoxydable, Critère de choix et structure», Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol, MB4, dossier M4540, Paris (2000).
- [5] **Document Internet**, «Introduction aux aciers inoxydables», consulté le 17 mai 2022, sur le site <https://www.infociments.fr/les-aciers-inox>
- [6] **Michel Dupeux**, «Aide-mémoire sciences des matériaux», éditions Dunod, Paris, 2004 (ISBN 978-2-10-005458-9), p. 212
- [7] **Pierre-Jean Cunat**, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, mars 2000.
- [8] **Document Internet**, «Acier inoxydable», sur le site techno-science.net.
- [9] **Document internet**, «Type d'acier inoxydable», consulté le 02 juin 2022 sur le site ferrosplanes.com.
- [10] **C. W. Kovach**. « High Performance Stainless Steels », Technical Marketing Resources, Inc, Pittsburgh, PA, USA, consultant au Nickel Development Institute, 2004.
- [11] **B. Barroux**, « Les aciers inoxydables ferritiques à 17% Cr », dans les aciers inoxydables, Editions de physique, Les Ulis, 1990.
- [12] **Techniques de l'ingénieur**, Traité matériaux métalliques, M 4.

- [13] **B. Chassignole**, « Influence de la structure métallurgique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason », Thèse de doctorat, Insa- Lyon. 2000.
- [14] **H. Granjon**. « Bases métallurgiques de soudage ». 2ème édition. Publication du soudage et de ses applications. Paris. 1995.
- [15] **Document internet**, «Qualité d'inox», alinco.be.
- [16] **Techniques de l'ingénieur**, Traité matériaux métalliques, M 1105.
- [17] **HIDOURI Abdelmoumen**, «Matériaux métalliques», ISET Gafsa, 2018.
- [18] **S.Kahlouche**, «Caractérisation de l'anisotropie plastique d'une tôle en alliage de titane», UMMTO, Mémoire, 2013.
- [19] **J-barralis et G-maeder** «précis de métallurgie, élaboration, structure, propriétés et normalisation» édition Nathan, 1983.
- [20] **Logiciel Solidworks**, www.solidworks.com .
- [21] **Logiciel de CFAO, IGEMS**, <https://www.directindustry.fr/prod/water-jet-sweden-ab/product-116053-2318727.html>.
- [22] **G. TURNER et G. DHATT**, « Une présentation de la méthode des éléments finis », Eds.P.U.L.Q., France, 1981.
- [23] **Jean-Christophe Cuillère**, «Introduction à la méthode des éléments finis», 2eme éditions Dunod, Paris 2011.
- [24] **Lakhdar Bessais**, «Analyse des structures par la M.E.F basée sur l'approche en déformation», Magister, université de Biskre, 2012
- [25] **Logiciel Abaqus**, www.ABAQUS.com.