

**REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI  
DE TIZI-OUZOU**

**FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



# **Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Option : Construction Mécanique**

## **Thème**

**Etude de voilage d'une tôle en acier au  
cours d'emboutissage par une méthode  
expérimentale et numérique**

**Proposé par :**

**Mme. SADOUDI Taoues**

**Dirigé par :**

**Mr. OULD OUALI Mohend**

**Mr. ZAROUKI Merzak**

**Réalisé par :**

**Mr. SADOU Fouad**

**Mr. TIOUCHICHINE Khalifa**

# **REMERCIEMENTS**

*Nous tenons tout d'abord à remercier « ﷻ » le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la santé, et pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier profondément notre encadreur **Mr. OULD OUALI Mohand** pour avoir dirigé ce mémoire. Nous tenons particulièrement à le remercier pour sa grande et constante disponibilité, la qualité de ses conseils, sa qualité humaine et la confiance qu'il nous a donnée durant ce travail.*

*Nos remerciements également aux **M<sup>r</sup>. ZEROUKI Merzak et M<sup>me</sup>. SADOUDI Taous**, pour leurs conseils leurs orientations durant notre étude.*

*Mes vifs remerciements vont aux membres de jury pour avoir accepté de juger notre présent travail.*

*En parallèle, nos remerciements vont également aux ingénieurs de l'entreprise ENIEM (Département technique de l'unité froid) et les ingénieurs de laboratoire au niveau de l'université de Boumerdess.*

*Je tiens également à remercier tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail et qui ils soient sincèrement remercié.*



# *Dédicace*

*«En vérité, le Chemin importe peu, la volonté d'arriver suffit à tout».*

*Albert Camus.*

*On dédie ce modeste travail de fin d'étude à :*

*Ceux qu'on aime le plus au monde, **a mes très chers parents** qui nous  
ont apporté leur soutien, dans les moments difficiles avec un tant d'amour et  
d'affection et qui ont souffert sans se plaindre afin qu'on atteigne ce niveau, que  
le bon Dieu leur accorde une longue vie.*

*A toute **ma famille**, qui nous ont toujours encouragés et soutenu dans  
les moments les plus durs, on vous souhaite une vie pleine de bonheur et de  
succès et que Dieu, vous protège et vous garde.*

*A mes **chers Amis**, pour leurs aides sans limites et leurs présences  
permanentes, à nos côtés, leurs soutiens et compréhension, que Dieu le tout  
puissant les protège et les gardent.*

***SADOU Fouad***

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon très cher père. Qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne et qui m'a donné le plus précieux soutien tout le long de mes études, pour que j'arrive à ce jour-là sans qu'il soit ici parmi nous A toi papa.*

*A m'a très chère mère qui ma soutenue tout au long de mes études et qui a sacrifiée. Sa vie pour bâtir la mienne. Que dieu me la protège.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis avec lesquelles j'ai partagé mes moments de joie et bonheur.*

*Que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Tiouchichine Khalifa*

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale.....1

## Chapitre I : procédés de mise en forme des tôles

I.1. Introduction..... 2

I.2. Pliage des tôles..... 2

I.2.1. Définition ..... 2

I.2.2. Principe du pliage..... 2

I.2.3. Différents modes de pliage..... 2

I.2.3.1. Pliage en V ..... 3

I.2.3.2. Pliage en l'air ..... 3

I.2.3.3. Pliage en frappe..... 3

I.2.3.4. Le pliage en U..... 4

I.2.4. Les caractéristiques d'un pli ..... 4

I.2.4.1. Rayon minimal de pliage ..... 4

I.2.4.2. Le retour élastique ..... 5

I.2.5. Outillage ..... 5

I.3. Procédé d'emboutissage..... 5

I.3.1. Généralités de l'emboutissage industriel..... 5

I.3.2. L'emboutissage en température ..... 7

I.3.2.1 L'emboutissage à froid ..... 7

I.3.2.2 L'emboutissage à chaud ..... 7

I.3.3 Les aciers d'emboutissage.....	8
I.3.3.1. Les acier standard pour emboutissage .....	8
I.3.3.2. Les aciers pour émaillage .....	9
I.3.4 Les tôles minces en acier pour emboutissage.....	9
I.3.5. Emboutissage à froid des tôles métalliques.....	11
I.3.6. Critères d'emboutissabilité.....	11
I.3.6.1. Le coefficient d'écrouissage .....	11
I.3.6.2 Le coefficient d'anisotropie .....	12
I.4.Défauts en mise en forme des tôles métalliques .....	13
I.4.1. Retour élastique.....	13
I.4.2. Striction .....	14
I.4.3. Plissement.....	15
I.4.4. Le voilage :.....	16
I.5.Conclusion .....	19

## **Chapitre II: Caractérisation mécanique et microstructural des aciers**

II.1. Introduction .....	20
II.2. Essai de traction.....	20
II.2.1. Principe de l'essai de traction .....	20
II.2.2 Courbe de traction.....	21
II.2.3 Forme et dimensions de l'éprouvette.....	21
II.2.4 Caractéristiques de l'essai de traction [17] .....	22
II.2.5 Traction longitudinale [18] .....	22
II.2.6 Traction transversale [18] .....	23
II.2.7 Traction hors axe [18] .....	24
II.2.8 Mesure des coefficients de Lankford (anisotropie) [19] .....	25

II.3 Essais de flexion 3 points .....	26
II.3.1 Principe .....	26
II.3.2 Machine de flexion .....	27
II.4 Essais de dureté [17] .....	28
II.4.1 Définition .....	28
II.4.2 Principe de l'essai de dureté .....	28
II.4.3 Types d'essai .....	28
II.4.3.1-Essai Brinell .....	28
II.4.3.2. Essai Vickers .....	29
II.4.3.3. Essai Rockwell .....	30
II.5. Examen métallographique [20] .....	31
II.6. Essai de pliage .....	32
II.7. Essai d'emboutissage.....	33
II.8. Conclusion        34	

## Chapitre III: Etude expérimentale

III.1 Introduction .....	35
III.2. Matériau étudié.....	35
III.3 Etude métallographique.....	35
III.4. Essais mécaniques .....	37
III.4.1. Essai de dureté .....	37
III.4.2. Essais de traction .....	38
III.4.2.1. Les résultats des essais de traction : Courbe conventionnelle .....	40
III.4.3 Essai de flexion.....	43
III.5. Conclusion        46	



## **Chapitre IV: Simulation numérique**

IV.1. Introduction .....	47
IV.2. Généralité sur le code de calcul ABAQUS .....	47
IV.2.1. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus .....	48
IV.2.1.1. Fichier d'entrée (Input file) : Extension.inp .....	48
IV.2.1.2. Fichier de résultats (output file) : Extension.odb.....	48
IV.2.2. Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation .....	48
IV.2.3. Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement) .....	48
IV.2.4. Les modules.....	49
IV.3. Simulation de l'essai de traction .....	54
IV.3.1. Le maillage .....	55
IV.3.2 paramètre de la simulation .....	55
IV.3.2.1 Elasticité : loi de Hook .....	55
IV.3.2.2 Critère de HILL : orthotropie.....	55
IV.3.3. Conditions aux limites.....	57
IV.3.4. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.....	57
IV.4. Simulation de l'essai de flexion .....	60
IV.4.1. Le maillage .....	61
IV.4.2. Les conditions aux limites.....	61
IV.4.3. Modèle simulation.....	62
IV.4.3.1. Elasticité : loi de Hook .....	62
IV.4.3.2. Critère de Hill : orthotropie .....	62
IV.4.4. Comparaison des courbes de flexion expérimentale et numérique .....	62
IV.5. Application : Simulation de l'emboutissage d'une tôle mince .....	63
IV.5.1. Le maillage .....	66
IV.5.2. Les conditions aux limites.....	67
IV.5.3. détermination de l'effort max. ....	67

IV.5.4. Simulation de voilage .....	68
IV.6. Conclusion .....	70
Conclusion générale .....	71

# Liste des figures

Figure I.1 : Principe de pliage .....	2
Figure I.2 : pliage en V.....	3
Figure I.3: pliage en l'air .....	3
Figure I.4 : pliage en frappe. ....	4
Figure I.5 : Pliage en U .....	4
Figure I. 6 : Opération de pliage d'une tôle. ....	4
Figure I. 7 : Retour élastique d'une tôle pliée.....	5
Figure I. 8: Procédé d'emboutissage [8]. ....	6
Figure I.9 : a) emboutissage en expansion, b) emboutissage en retreint.....	6
Figure I.10 : L'emboutissage à froid.....	7
Figure I.11 : L'emboutissage à chaud.....	8
Figure I.12 : Positon des éprouvettes de traction par rapport à la direction de laminage $D_L$ de la tôle pour la mesure de coefficient d'anisotropie d'une tôle. ....	12
Figure I.13 : Exemple de déformées obtenues à la fin puis après l'étape d'emboutissage (simulation par élément finis). ....	14
Figure I.14 : Indicateurs du niveau du retour élastique dans l'essai « Oméga ».....	14
Figure I.15 : Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas). ....	15
Figure I.16 : Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible). ....	16
Figure I.17 : Porte de four à micro-ondes voilée.....	17
Figure I.18 : Les déformations quand un panneau plat se voile.....	17
Figure I.19 : Variation de la flèche de voilage avec la profondeur .....	18
Figure I.20 : Pièce voilée (à gauche) et sa simulation numérique (à droite). ....	18
Figure II.1 : Principe de l'essai de traction .....	20
Figure II.2 : Diagramme conventionnel d'un essai de traction .....	21
Figure II.3 : Forme générale de l'éprouvette de traction.....	21

Figure II.4 : Traction longitudinale .....	23
Figure II.5 : Traction transversale .....	23
Figure II.6 : Traction hors axe.....	24
Figure II.7 : Orientation des éprouvettes de traction.....	25
Figure II.8 : l'essai de flexion .....	27
Figure II.9 : Machine de flexion.....	27
Figure II.10 : Essai de dureté Brinell. ....	29
Figure II.11 : Principe de l'essai Vickers .....	30
Figure II.12 : Principe des essais Rockwell (HRB, HRC) .....	31
Figure II.13 : Représentation schématique d'un microscope optique .....	32
Figure I.14 : Epreuve pliée.....	33
Figure II.15 : Essai d'emboutissage sur une tôle revêtue.....	34
Figure III. 1. Echantillon sous forme parallélépipédique.....	35
Figure III.2 : microstructure de l'acier DC04 EK (gx200).....	36
Figure III.3 : microstructure de l'acier DC04 EK (gx400). ....	36
Figure III. 4 : Duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC ».....	37
Figure III.5 : Epreuve de traction normalisée selon la norme NF EN 10209 DC04 EK, m	38
Figure III.6 : Les éprouvettes selon les trois directions. ....	39
Figure III.7: Machine de traction Zwick/ Roell Z250.....	39
Figure III.8: valeur moyenne de module de Young selon les trios direction. ....	41
Figure III. 9: Rupture des éprouvettes selon les trois directions 45°, 90° et 0°. ....	41
Figure III. 10: Superposition des courbes de traction. ....	42
Figure III. 11: caractéristiques mécaniques de l'acier NF EN 10209 .....	42
Figure III.12: Epreuve de flexion normalisée selon la norme NF EN 10209 DC04 EK, m	44
Figure III.13: Les éprouvettes avant déformation selon trois directions.....	44
Figure III.14: Dispositif d'essai et dimension de flexion trois points.....	44
Figure III.15: les éprouvettes après l'essai de flexion selon les trois directions. ....	45

Figure III.16: Superposition des courbes de flexion .....	45
Figure III.17: l'évolution force max/ flèche max des éprouvettes selon les trois D/L.....	46
Figure IV. 1 : Structure d'une analyse sous Abaqus [18]. .....	48
Figure IV. 2 : Organisation d'Abaqus [19] .....	49
Figure IV.3: Réalisation de la mise en données d'un problème.....	49
Figure IV.4: Module Part .....	50
Figure IV.5: propriété Matériaux et section .....	50
Figure IV.6: Instance et assemblage .....	51
Figure IV.7: Création de step .....	51
Figure IV.8: interaction .....	52
Figure IV.9: Création des chargements.....	52
Figure IV.10: Création de maillage.....	53
Figure IV.11: Lancement de calcul .....	53
Figure IV.12: Affichage des résultats [21].....	53
Figure IV.13: Les démentions d'éprouvette simulée sur ABAQUS en mm. ....	54
Figure IV.14: Le maillage utilisé pour l'éprouvette (0.5mm).....	55
Figure IV. 15 : Répartition des conditions limite.....	57
Figure IV. 16 : comparaison des courbes de Contrainte- .....	57
Figure IV. 17 : Comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et .....	58
Figure IV. 18 : comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et numérique selon la direction 90°/DL .....	58
Figure IV. 19: Les contours des déplacements, déformations et contraintes selon la direction de laminage .....	59
Figure IV. 20 : La rupture d'éprouvette selon la direction 45°/DL.....	59
Figure IV. 21 : La rupture d'éprouvette selon la direction 90°/DL.....	60
Figure IV. 22 : Les démentions d'éprouvette simulée sur ABAQUS.....	61
Figure IV. 23 : Le maillage. ....	61
Figure IV. 24 : Répartition des conditions limite.....	62

Figure IV. 25 : Comparaison de la courbe expérimental et numérique de la force – déplacements. ....	63
Figure IV. 26 : Simulation de l’essai de flexion .....	63
Figure IV. 27 : Flan .....	64
Figure IV. 28: Serre flan .....	64
Figure IV. 29 : Matrice.....	65
Figure IV. 30: Poinçon .....	65
Figure IV. 31 : Positionnement des éléments du procédé d’emboutissage.....	66
Figure IV. 32 : Le maillage de la tôle. ....	66
Figure IV. 33 : Représentation des conditions aux limites.....	67
Figure IV. 34: Evolution de l’effort su le poinçon en fonction de la course.....	67
Figure IV. 35 : L’évolution de la force en fonction de temps .....	68
Figure IV. 36 : Courbe de déplacement de poinçon en fonction de tramps .....	69
Figure IV. 37 : La distribution des contraintes sur la pièce obtenue.....	69
Figure IV. 38 : La répartition des déplacements au cours de l’emboutissage.....	70
Figure IV. 39 : Montre l’image réelle d une pièce auto nettoyante de cuisinière voilée. ....	70

# Liste des tableaux

Tableau I. 1: Les quatre classes de tôles définies par la norme française NF A 36-301.....	9
Tableau I. 2 : Caractéristiques mécaniques des produits plats laminés à froid [9]. ....	10
Tableau I. 3 : composition chimique des produits plats (en acier doux) pour emboutissage et pliage à froid [9]. ....	10
Tableau III. 1: Composition chimique en % massique .....	35
Tableau III. 2 : Caractéristique mécanique des aciers.....	35
Tableau III. 3 : Résultats des essais de dureté Vickers (HV) de l'acier NF EN 10209.....	38
Tableau III. 4: Valeurs numériques des caractéristiques de résistance. ....	40
Tableau III. 5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier NF EN 10209 .....	40
Tableau III. 6: Les valeurs calculées des coefficients d'anisotropies. ....	43
Tableau IV. 1 : Coefficients de Hill. ....	56
Tableau IV. 2 : Coefficient $R_{ij}$ .....	56
Tableau IV. 3 : Coefficient $R_{ij}$ .....	62

# Liste des symboles

---

## Liste des symboles

Re : Limite d'élasticité apparente [MPa]

F : Charge limite apparente d'élasticité [N]

S : Section initial [mm<sup>2</sup>]

Rm : Resistance a la traction [MPa]

Fm : Charge maximal [N]

A : Allongement à la rupture [%]

Lu : Longueur de l'éprouvette reconstituée après la rupture [mm]

Lo : Longueur initiale de l'éprouvette [mm]

Z : Coefficient de striction [%]

Zu : L'allongement de striction [%]

Su : Section minimal d'éprouvette après rupture [mm]

$\sigma_{xx}$  : Contrainte maximal [MPa]

EL : Déformation longitudinal []

v : Déformation transversal []

$\sigma_{yy}$  : Contrainte normal [MPa]

E : Modula de Young [MPa]

$n$  : Coefficient lankford

$\sigma_{max}$  : Contrainte maximal [ MPa]

$y_{max}$  : Valeur maximal de flèche [mm]

I : Moment d'initie de poutre [mm<sup>4</sup>]

H : Symbole de durezza [MPa]



# Liste des symboles

---

Hv : Dureté vickers [MPa]

D : Diagonale de l'empreinte [mm]

b : Largeur de l'éprouvette [mm]

# **Introduction générale**

# Introduction générale

La fabrication de pièces métalliques par emboutissage des tôles est une méthode industrielle courante. Il est possible de produire par emboutissage des tôles minces aussi bien des pièces pour électroménager que des éléments de carrosserie automobile.

Cependant, pour les fabricants des tôles pour emboutissage, un des problèmes principaux est de savoir si les caractéristiques d'une tôle sont suffisantes pour réussir une pièce donnée et son aptitude à donner une surface creuse de forme quelconque, non développable, à partir d'une surface plane.

Le grand inconvénient rencontré durant l'emboutissage de la tôle mince en acier est l'apparition de certains défauts de surface sur les emboutis obtenus : des fissurations, des plissements, des cornes d'emboutissage ou des amincissements locaux. Durant l'opération d'emboutissage, l'anisotropie des propriétés plastique intervient fortement dans le comportement de la tôle.

Ce travail est dédié à l'étude expérimentale et numérique de la plasticité d'une tôle mince en acier utilisées en emboutissage dans l'industrie électroménager.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, donne un aperçu sur le procédé en mise forme par déformation plastique (emboutissage, pliage).

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques expérimentales. Nous avons présenté la méthode de détermination de la composition chimique. Les normes de caractérisations mécaniques par les essais de traction et flexion. Ainsi que les essais d'emboutissage.

Le troisième chapitre c'est une partie expérimentale initiée par étude métallographique de notre matériau puis un ensemble des essais de traction, flexion et dureté pour déterminer ces caractéristiques mécanique.

Le quatrième chapitre regroupe les résultats expérimentaux et numériques. Après identification des paramètres matériau des lois de comportements utilisées, nous avons effectué des comparaisons entre les prédictions numériques avec les résultats expérimentaux.

# **Chapitre I**

## **Procédés de mise en forme des tôles**

## I.1. Introduction

La technique de mise en forme des tôles la plus utilisée est l'emboutissage à froid, qui consiste à obtenir, à partir de tôles planes prédécoupées (ou flan), une pièce dont la forme est constituée de surfaces non développables. Ce chapitre donne un aperçu sur le procédé de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, pliage).

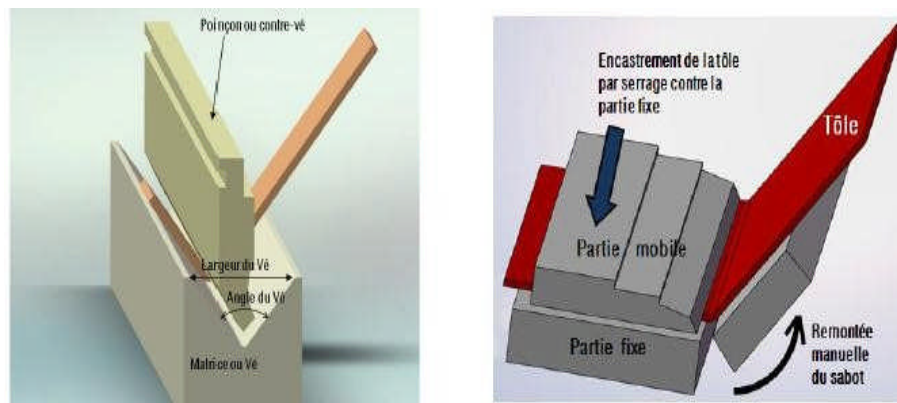
## I.2. Pliage des tôles

### I.2.1. Définition

Le pliage est un procédé d'obtention de pièces par déformation plastique à partir des tôles plates. La forme à obtenir est une forme développable. C'est à dire en « dépliant » la pièce on peut obtenir, ou presque, la forme initiale du flan. Ceci étant en négligeant les allongements dus aux rayons de pliage [1].

### I.2.2. Principe du pliage

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu.



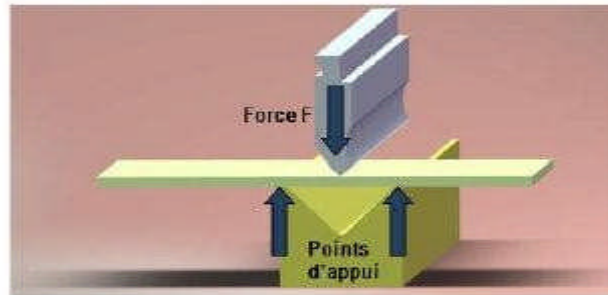
**Figure I.1 : Principe de pliage**

### I.2.3. Différents modes de pliage

Suivant la géométrie des poinçons et les matrices, trois types de pliage sont distingués : en V, en U et en L [2].

### I.2.3.1. Pliage en Vé

Dans le cas du pliage en V, le serre-flan est inutile. La variation de l'angle du V du poinçon et de la matrice entraîne la variation de l'angle de formage de la tôle. Selon la course imposée au poinçon, le pliage est en l'air ou en frappe.

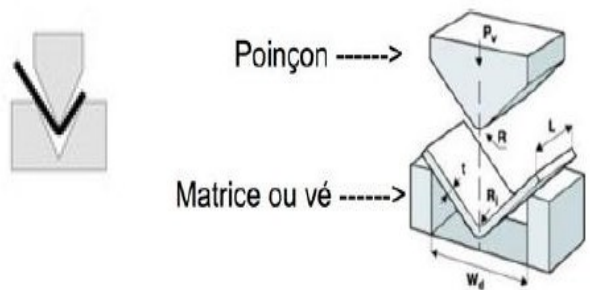


**Figure I.2 : pliage en Vé**

### I.2.3.2. Pliage en l'air

L'effort de pliage cesse quand la tôle arrive en fin de V. L'angle terminal est celui de la forme du Vé plus le retour élastique de la tôle ( $\approx 3^\circ$ ).

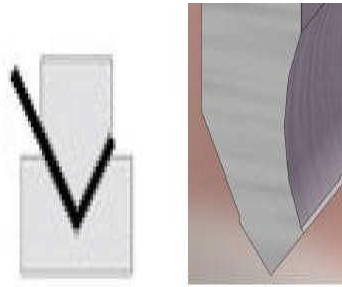
Avec le pliage « en l'air », suivant la position du poinçon en fin de course, différents angles peuvent être obtenus avec le même outillage.



**Figure I.3: pliage en l'air**

### I.2.3.3. Pliage en frappe

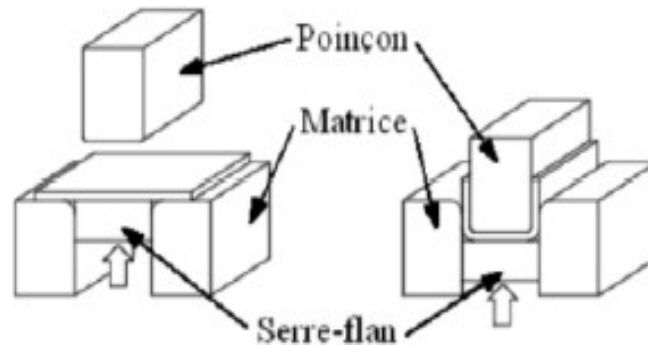
Cette opération de pliage s'effectue en deux temps. Tout d'abord, un pliage « en l'air » est effectué jusqu'à l'angle désiré. Ensuite, le poinçon descendu rapidement, va frapper et marquer la tôle jusqu'à réduire voire éliminer totalement le retour élastique. L'angle du poinçon et de la matrice sont égaux à l'angle à obtenir.



**Figure I.4 :** pliage en frappe.

#### I.2.3.4. Le pliage en U

Le pliage en U comprend un serre-flan mobile qui bloque la matière sous le poinçon et évite donc les glissements de la tôle lors de la mise en forme entre les deux blocs matrices.

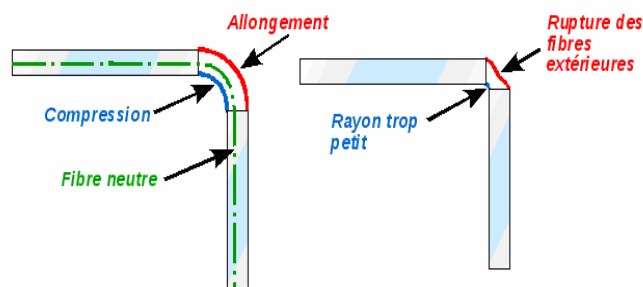


**Figure I.5 :** Pliage en U

#### I.2.4. Les caractéristiques d'un pli

##### I.2.4.1. Rayon minimal de pliage

Lors du pliage d'une tôle, dans le pli, se produit une déformation plastique. Cette déformation est de type allongement de la partie extérieure et compression de la partie intérieure [3]. Cette déformation doit assurer la non rupture du matériau dans cette zone. Autant le rayon de pliage est grand, autant la déformation plastique est minimale. La fibre neutre est une fibre qui ne subit pas de déformation [4].



**Figure I. 6 :** Opération de pliage d'une tôle.

### I.2.4.2. Le retour élastique

Lors du pliage d'une pièce à un angle imposé par l'outillage (angle du vé sur presse plieuse), il y a un retour élastique lors du retrait du poinçon [5].

L'angle final  $\alpha_f$  obtenu diffère de celui imposé par l'outillage ( $\alpha_i$ ) de la valeur correspondant à ce retour élastique. Plus la limite élastique de l'alliage est grande plus le retour élastique sera grand. On peut vouloir estimer ce retour élastique qui dépend aussi du rayon de pliage et de l'épaisseur.

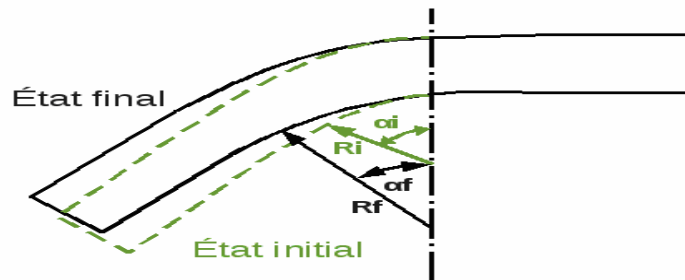


Figure I. 7 : Retour élastique d'une tôle pliée.

### I.2.5. Outillage

Les opérations de pliages se font sur des machines appelées presses plieuse. Les types de presses plieuses les plus utilisées sont :

- La **plieuse a tablier** : cette machine convient mieux dans un petit atelier de tôlerie.
- Les **presses plieuses** : sont des machines très puissantes que l'on utilise pour les pliages de métaux en feuilles de toutes épaisseurs.

## I.3. Procédé d'emboutissage

### I.3.1. Généralités de l'emboutissage industriel

L'emboutissage des tôles minces est un procédé de mise en forme couramment utilisé dans l'industrie. Il consiste à déformer plastiquement des tôles minces à chaud ou à froid afin d'obtenir des pièces de formes complexes. Ce mode de formage s'effectue sur une presse au moyen d'un outillage dont la configuration détermine l'effet obtenu sur le flan :

- Outils à **simple effet** : configuration la plus simple, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon.
- Outils **double effet** : comprend en plus de l'outil simple effet, un serre-flan.

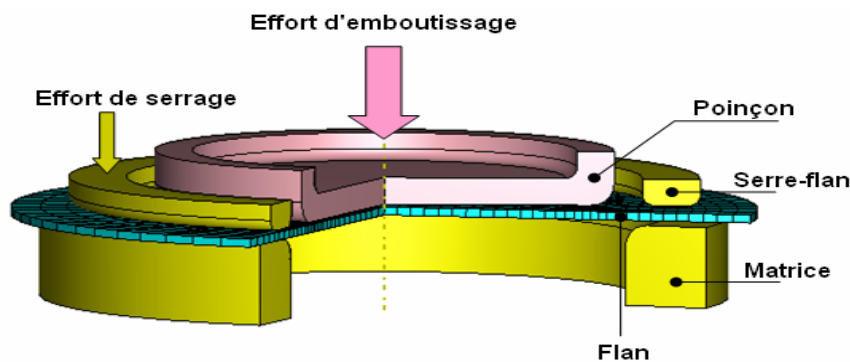


L'outillage utilisé en emboutissage comprend donc (voir la Figure I.8) :

- ✓ **Un poinçon** : couissant plus ou moins vite sur l'axe vertical, et déformant la tôle.
- ✓ **Une matrice** : elle serre d'appuie a la tôle et lui donne la forme extérieure finale au

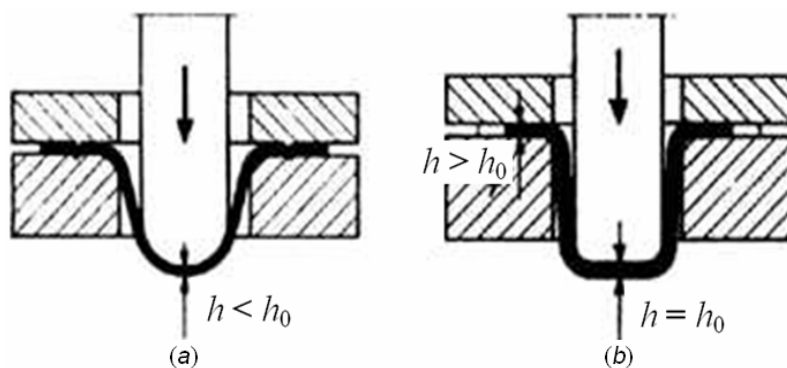
Retour élastique prés.

- ✓ **Un serre flan** : Son rôle est de maintenir plus ou moins le flan lors d'une opération d'emboutissage afin d'assurer un écoulement homogène du métal et prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage.
- ✓ D'autres éléments caractérisant le type de presse.



**Figure I. 8:** Procédé d'emboutissage [8].

L'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation dont le but est de conduire à l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation : **l'expansion et le retraits** (Figure I.9).



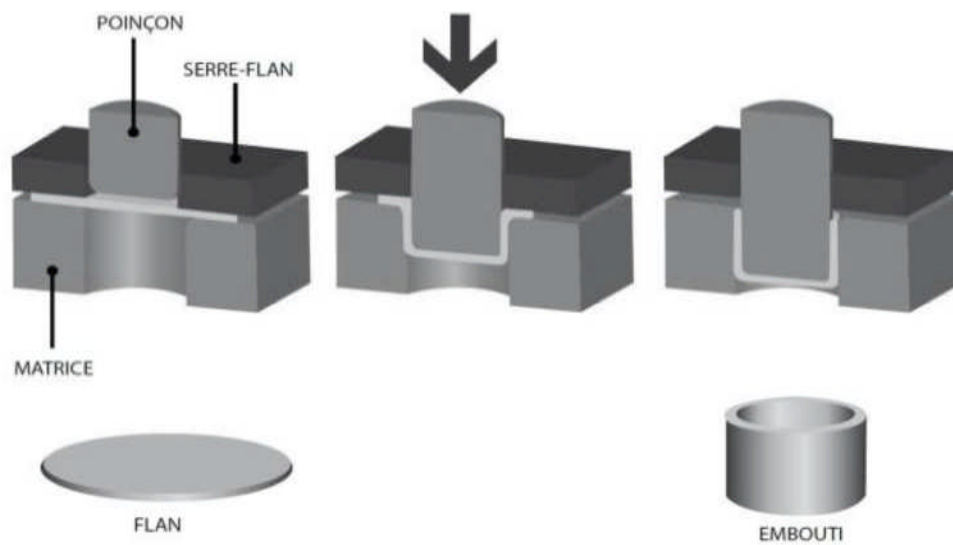
**Figure I.9 :** a) emboutissage en expansion, b) emboutissage en retraits

Le schéma (a) met en évidence un emboutissage par expansion sur le poinçon, le flan étant bloqué sous la serre flan : l'épaisseur sous le poinçon diminue. Le schéma (b) montre un emboutissage profond avec retrait du métal glissant sous le serre-flan, l'épaisseur entre serre flan et matrice diminue.

### I.3.2. L'emboutissage en température

#### I.3.2.1 L'emboutissage à froid

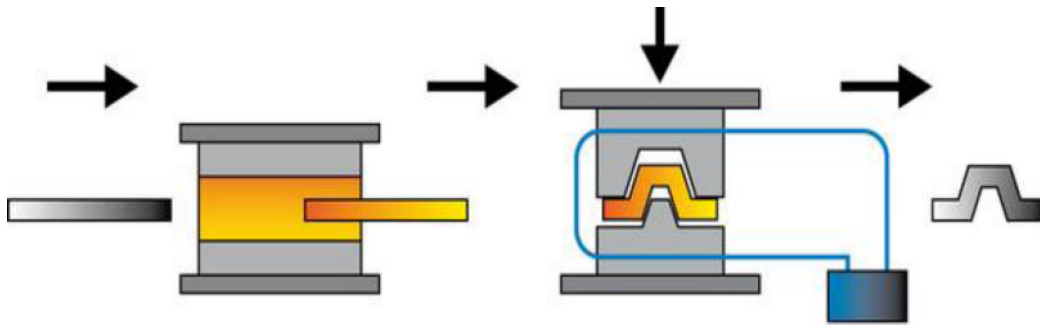
Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage double effet mais peut aussi l'être sur un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique. En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes.



**Figure I.10 :** L'emboutissage à froid

#### I.3.2.2 L'emboutissage à chaud

Principalement utilisé sur presses hydrauliques simple ou double effet, le formage de fonds de réservoir [9] en acier est le plus important domaine d'application. Cette technique facilite la déformation du matériau, permet l'emboutissage de pièces profondes par chauffage du flan (et de la matrice) et évite l'écrouissage et la formation de contraintes résiduelles. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid du fait de l'inertie de chauffage. De plus les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement.



**Figure I.11 :** L'emboutissage à chaud

### I.3.3 Les aciers d'emboutissage

Les aciers effervescents sont longtemps restés l'unique qualité utilisée pour l'emboutissage, leur formabilité était très limitée en comparaison de ce que nous connaissons aujourd'hui. De plus, étant sujets à un vieillissement plus rapide, ils obligeaient les fabricants de pièce visible d'automobile à mastiquer et poncer celle-ci pour leur conférer la qualité cosmétique nécessaire. Une autre solution consistait à passer les flans, juste avant l'emboutissage, dans une sorte de vigoureuse planeuse qui supprimait provisoirement le palier de limite d'élasticité mais qui écrouissait le métal, réduisant ainsi sa ductilité.

Vers 1975, une grande évolution a eu lieu dans le monde de l'emboutissage : on a cessé d'utiliser uniquement l'acier doux formable et l'on a introduit des nuances à plus haute limite d'élasticité, ceci dans le but de réduire les épaisseurs pour gagner sur le poids des véhicules. Cette tendance n'a fait que se renforcer depuis avec l'apparition des aciers à hautes et très hautes caractéristiques.

Pour que la présentation des différentes qualités d'aciers au carbone qui suivra soit utile, il nous faut préciser quelques notions métallurgiques qui permettent de les différencier et de comprendre en quoi les caractéristique mécaniques de certaines nuances sont favorables (ou défavorables) à certains types de formage.

#### I.3.3.1. Les acier standard pour emboutissage

Les aciers destinés à l'emboutissage et auxquels on ne demande ni les caractéristiques de ténacité ( $R_e$ ,  $R_m$ ) particulièrement élevées, ni un niveau de formabilité exceptionnel, sont principe des aciers doux. Leur matrice est essentiellement constituée de ferrite l'égerment alliée (Mn, Si) et d'une faible quantité de carbures.

### I.3.3.2. Les aciers pour émaillage

Ce sont en général des aciers doux, du genre de ceux que nous venons de voir. Ils présentent cependant une particularité importante, destinés à éviter un défaut grave qu'on appelle le [coup d'ongle]. De quoi s'agit-il ? l'émaillage est une technique de revêtement qui consiste à déposer sur le subjectile, par enrobage, pulvérisation conventionnelle ou électrostatique, une couche de barbotine constituée par un mélange d'eau et d'oxyde métalliques (silice, alumine) finement broyées, aux fontes et aussi aux aciers.

### I.3.4 Les tôles minces en acier pour emboutissage

La technique moderne de laminage permet d'obtenir actuellement des tôles d'acier très minces avec des tolérances rigoureuses, une surface propre et lisse, un grain fin, une structure homogène et une gamme de très bonnes caractéristiques mécaniques s'adaptant aux nécessités imposées par des opérations d'emboutissage difficiles. Selon la norme AFNOR NF A 36-301 (juin 1992), les tôles sont classées :

- D'après leurs caractéristiques d'emboutissage : tôle de fabrication courante TC, tôle emboutissable E, tôle pour emboutissage sévère ES ;
- D'après l'aspect de la surface (en ce qui concerne E et ES) : qualité X pour laquelle il est admis une légère coloration, de faibles rayures et de légères gravelures, qualité Z dont la face considérée comme visible et pratiquement sans défaut.

Cette classification permet d'obtenir quatre combinaisons indiquées dans le tableau suivant :

	E	ES
X	XE	XES
Z	ZE	ZES

**Tableau I.1 :** Les quatre classes de tôles définies par la norme française NF A 36-301

Actuellement cette classification est remplacée par la nouvelle norme Européenne EN 10-130 constituées de cinq nuances définies comme suit (Tableau I.2) :

- La nuance de base Fe P01 ;
- Des nuances d'emboutissage Fe P03 et Fe P04 a garantie de coefficient d'anisotropie  $r_{90}$  respectivement 1.3 et 1.6 ;
- Une nuance de qualité super emboutissage Fe P05 avec garantie de  $r_{90}$  de 1.9 et du coefficient d'écrouissage  $n_{90}$  de 0,210 et une nuance sans interstitiels Fe P06 a garantie de  $r$  moyen et  $n$  moyen  $r$  de 1,8 et 0,220 respectivement.

Les caractéristiques mécaniques mentionnées sont valables pour une période limitée dans le temps et uniquement à l'état normal de livraison skin-passé. Ceci est lié au phénomène de vieillissement. Pour cela, les délais contractuels de mise en œuvre à partir de la mise à disposition par le fabricant sont des éléments importants pour l'utilisation de ces aciers et font l'objet de cette actuelle norme européenne.

Il y a lieu de noter que les deux aspects de l'état de surface de définit dans l'ancienne norme français par les lettres X et Z sont remplacés respectivement par lettre A et B.

Nuances	Garantie des propriétés mécaniques	Aspect de surface	Limite d'élasticité Re (Mpa)	Résistance à traction Rm (Mpa)	Coefficients	
					D'anisotropie r90	D'écrouissage n90
<b>Fep 01</b>		A B	280	270 à 410	...	...
<b>Fep 03</b>	6moins 6moins	A B	240	270 à 370	1.3	...
<b>Fep 04</b>	6moins 6moins	A B	210	270 a350	1.6	0.180
<b>Fep 05</b>	6moins 6moins	A B	180	270 à 35	1.9	0.220
<b>Fep 06</b>	6moins 6moins	A B	182	270 à 350	r <sub>min</sub> = 1.8	n <sub>min</sub> = 0.220
<p>Le fabricant garanti les caractéristiques mécaniques prévues et l'absence des vermiculures a des déterminées indiquées dans un tableau. Au-delà de ces délais, le phénomène de vieillissement qui engendre de modification de propriétés mécaniques ainsi que l'apparition de vermiculures qui sont en fait des bandes multiples de glissement qui émergent a la surface libre de la tôle.</p> <p>0, 45,90 : valeurs en degré de l'angle entre la direction de traction est celle de laminage.</p>						

**Tableau I.2.**Caractéristiques mécaniques des produits plats laminés à froid [9].

Ces nuances d'acier normalisées concernent les tôles laminées à froid destinées à l'emboutissage et pliage à froid. Le tableau I.3 définit ces nuances comme des aciers doux (teneur en carbone = 0.02 au 0.12%).

Nuances	Composition chimique			
	C max. %	Mn max. %	P max. %	S max. %
<b>FeP 01</b>	0.12	0.60	0.045	0.045
<b>FeP 03</b>	0.10	0.45	0.035	0.035
<b>FeP 04</b>	0.08	0.40	0.030	0.030
<b>FeP 05</b>	0.06	0.35	0.025	0.025
<b>FeP 06</b>	0.02	0.25	0.020	0.020

**Tableau I.3 :** composition chimique des produits plats (en acier doux) pour emboutissage et pliage à froid [9].

### I.3.5. Emboutissage à froid des tôles métalliques

L'emboutissage à froid est une déformation plastique à température ambiante, qui consiste en la mise en forme d'une tôle de métal plane convenablement découpée et appelée flanc, en une forme creuse de géométrie plus ou moins complexe, au moyen d'un outillage spécial monté sur une presse [10].

L'outillage se compose d'au moins trois éléments principaux (Figure I.8) :

- Le poinçon qui délimite le contour intérieur,
- La matrice qui délimite le contour extérieur,
- Le serre-flanc qui, en pressant sur le métal contre la matrice, évite son plissement et contrôle son écoulement le long du poinçon.

Les pièces embouties peuvent être très complexes et nécessitent une dizaine d'opérations successives pour parvenir au produit final. La conception des outillages délicats. Il faut maîtriser la déformation qui peuvent donner lieu à l'apparition de criques à la surface de la tôle. Le formage des tôles est un problème complexe faisant intervenir de nombreux paramètres [11] :

- Ceux liés à la forme que l'on veut obtenir ;
- Ceux liés au procédé et à l'outillage choisis ;
- Ceux liés à la tôle utilisée.

### I.3.6. Critères d'emboutissabilité

Les opérations de formage, plus particulièrement l'emboutissage, que doit subir la tôle pour l'obtention du produit fini, nécessitent pour cette dernière des propriétés mécaniques spécifiques liées à des critères d'emboutissabilité (aptitude au formage). Ces grandeurs concernent le coefficient d'écrouissage «  $n$  » et le coefficient d'anisotropie «  $r$  » qui sont déterminés par l'essai de traction.

#### I.3.6.1. Le coefficient d'écrouissage

Le coefficient d'écrouissage est lié à la consolidation du matériau. Si deux tôles de même valeur  $n$  mais de coefficient d'élasticité  $K$  différent sont embouties, elles se comporteront de façon semblable malgré des forces d'emboutissage différentes. Le coefficient d'écrouissage est obtenu à partir de la courbe rationnelle de traction reliant la relation

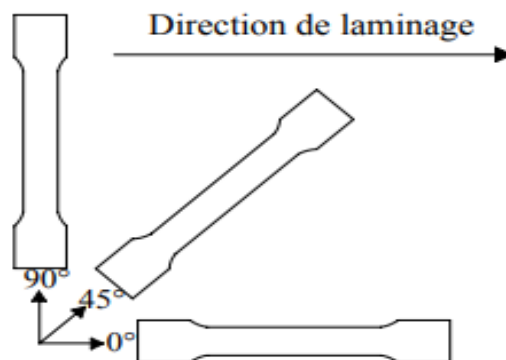
$\sigma = F/S$  à la déformation rationnelle  $\varepsilon = \ln (S/S_0)$ . (Avec  $\sigma$  la contrainte,  $F$  la force appliquée et  $S$  la section réelle.)

### I.3.6.2 Le coefficient d'anisotropie

On distingue l'anisotropie structurale et l'anisotropie des propriétés mécaniques. Cette dernière est la conséquence de la première. Dans les essais de traction, on remarque souvent l'apparition d'une zone de striction avant la rupture des éprouvettes.

L'anisotropie se manifeste par des différences de propriétés suivant la direction de prélèvement des éprouvettes par rapport à la direction de laminage  $D_L$  de la tôle.

Afin de quantifier cette anisotropie, on utilise le coefficient d'anisotropie plastique, représenté par  $r_\phi$ . Il exprime le rapport entre la déformation en largeur et la déformation en épaisseur d'une éprouvette plate dans une direction  $\phi$  par rapport à la direction de laminage  $D_L$ . Une éprouvette usinée à partir d'une plaquette de tôle (figure I.12) permet de définir, après essai de traction dans le domaine plastique homogène.



**Figure I.12 :** Position des éprouvettes de traction par rapport à la direction de laminage  $D_L$  de la tôle pour la mesure de coefficient d'anisotropie d'une tôle.

Chaque éprouvette d'orientation donnée de volume utile initiale  $V_0 = e_0 w_0 L_0$  sera déformée plastiquement et l'essai est interrompu avant d'attendre la charge de (charge maximale) qui provoque la localisation des déformations (striction). L'éprouvette après cet essai interrompu conserve son volume utile  $V = e \cdot w \cdot L$  sans apparition de la zone de striction.

Comme la mesure de la variation de l'épaisseur implique des erreurs importantes (épaisseur très faible), il est préférable d'effectuer plutôt la mesure de l'allongement sur la longueur  $L$  de l'éprouvette. Pour évaluer le coefficient d'anisotropie, il suffit d'arrêter l'essai de traction dans la zone d'allongement homogène avant d'atteindre la charge de rupture.

Pour les aciers doux, un allongement de 15 à 20% est souvent utilisé [15] ; [12].

On définit une valeur moyenne du coefficient d'anisotropie en faisant intervenir plusieurs directions de sollicitation ; la formule la plus courante pour les aciers doux est :

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

Cette valeur caractérise l'anisotropie normale de la tôle c'est-à-dire la résistance à l'amincissement, car  $r$  élevé signifie que la déformation en largeur l'emporte sur la déformation en épaisseur.

#### I.4. Défauts en mise en forme des tôles métalliques

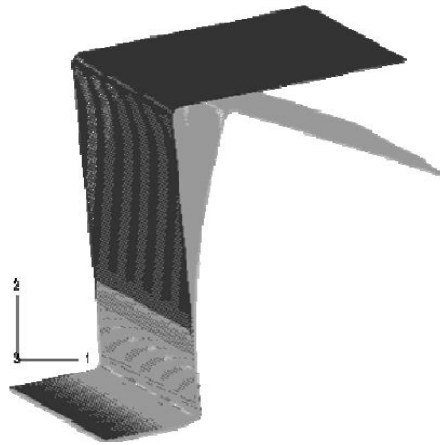
Au cours des opérations de mise en forme des tôles métalliques et parfois postérieurement, divers défauts peuvent apparaître sur les pièces. Ces défauts peuvent être classés en deux catégories : les défauts globaux et les défauts locaux, que nous définissons comme suit :

- Un défaut global concerne la géométrie finale de la pièce. A l'issue de l'opération de mise en forme d'une tôle, par exemple par emboutissage, la géométrie finale obtenue après enlèvement des outils peut ne pas correspondre exactement à la forme recherchée. Deux phénomènes sont essentiellement à l'origine de ces défauts : le retour élastique et le plissement.
- Un défaut local concerne des zones plus ou moins réduites de la pièce, où une diminution nette de l'épaisseur, voire rupture, peut apparaître. La striction localisée en est un exemple. D'autres phénomènes plus rares, comme la rupture différée en est un autre.

##### I.4.1. Retour élastique

Lors de la mise en forme d'une tôle métallique par emboutissage, la forme recherchée est celle définie par le profil des outils à la fin de l'étape d'emboutissage. Cependant, après extraction de la pièce, elle se relâche et la forme de la pièce évolue vers un nouvel état d'équilibre jusqu'à relaxation des contraintes. La (Figure I.13), montre un exemple d'une déformée obtenue juste à la fin de l'étape d'emboutissage puis après enlèvement des outils. Elle illustre clairement la différence entre les deux déformées.

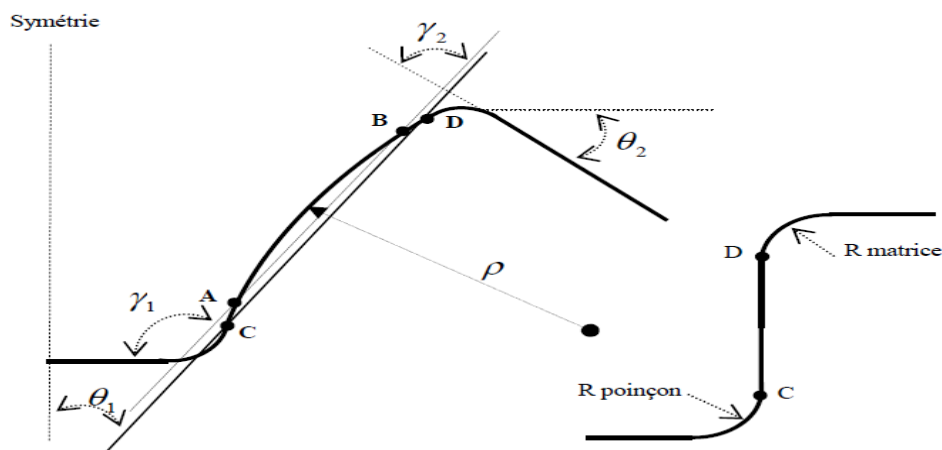




**Figure I.13 :** Exemple de déformées obtenues à la fin puis après l'étape d'emboutissage (simulation par élément finis).

Divers essais ont été proposés dans la littérature pour caractériser ce phénomène. Le plus fréquemment utilisé est l'essai dit en « Oméga », proposé à la conférence Numisheet'93.

La caractérisation expérimentale consiste à mesurer certains indicateurs du niveau du retour élastique pour différentes conditions de mise en forme. Dans le cas de l'essai « Oméga », ces indicateurs sont les angles de rotation des parois, ainsi que la courbure de la paroi, tels que montrés sur la (Figure I.14).



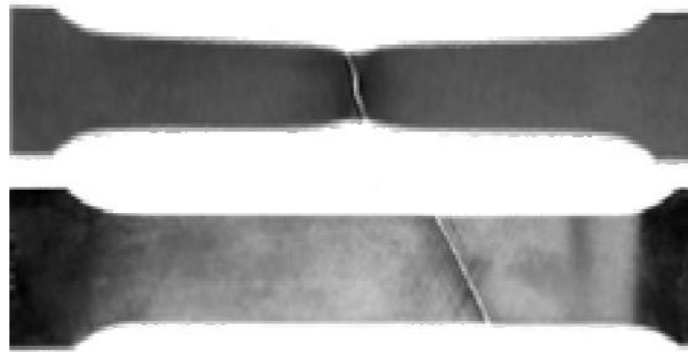
**Figure I.14 :** Indicateurs du niveau du retour élastique dans l'essai « Oméga ».

#### I.4.2. Striction

La faisabilité de la pièce par grandes déformations plastiques dépend de l'aptitude de la tôle à se déformer d'une manière quasi-homogène. Cette striction est caractérisée par la diminution de l'épaisseur de la tôle. Deux types de striction peuvent être définis : diffuse et localisée. La striction diffuse est caractérisée par une large zone de concentration des déformations et la striction localisée est caractérisée par une concentration des déformations

dans des zones étroites, principalement sous forme de bandes. Ces bandes sont le lieu de rupture par fissuration lors de la mise en forme du matériau.

La (Figure I.15) montre la différence en termes de striction entre une tôle épaisse et une tôle mince lors d'un essai de traction uni axiale. Sur la tôle épaisse, nous remarquons une réduction de la largeur de l'éprouvette par rétreint avant rupture, signe de striction diffuse avant localisation. Par contre, sur la tôle mince la déformation est concentrée principalement dans une bande étroite où l'épaisseur diminue jusqu'à rupture.



**Figure I.15 :** Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas).

#### **I.4.3. Plissement**

Les tôles métalliques sont très sensibles au flambement. Ceci se traduit au cours de la déformation de la tôle par la formation de plis. Ce phénomène est dû aux contraintes de compression qui se développent au cours de la mise en forme et qui agissent dans le plan de la tôle comme des efforts de flambement.

Comme le montre la (Figure. I.16), lors de l'opération d'emboutissage d'un godet, ce phénomène peut se manifester au voisinage du bord de la tôle. Il est d'autant plus prononcé que l'effort de serrage est faible. De plus, ces contraintes de compression sont d'autant plus grandes que le diamètre initial du flan est grand par rapport au diamètre du poinçon.

L'augmentation de l'effort de serrage génère des efforts normaux au plan de la tôle qui tendent à éliminer ce phénomène (photo de gauche). Néanmoins, cette solution n'est pas sans risque, car elle empêche l'écoulement de la matière et peut conduire à une rupture prématurée de l'embouti.



**Figure I.16 :** Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible).

#### I.4.4. Le voilage

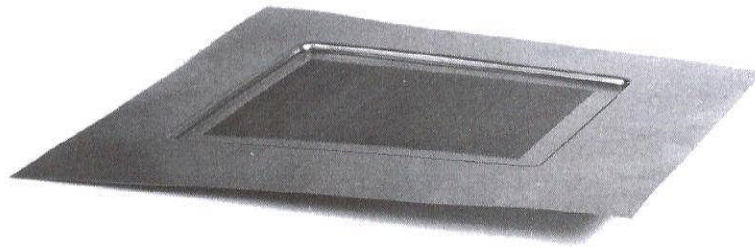
Le voilage est aussi une conséquence du retour élastique. C'est un défaut qui, sans être nouveau, prend maintenant de l'importance, pour plusieurs raisons. Il est plus particulièrement redouté dans le domaine de l'électroménager qui emploie de nombreux panneaux plats.

Les réductions d'épaisseur sont très favorables à son apparition, cela se traduit par une diminution de la rigidité de la pièce qui induit une instabilité élastique. Or, on diminue constamment l'épaisseur pour gagner du poids dans les transports ou pour réduire le prix dans l'électroménager.

Ensuite, ces diminutions d'épaisseur sont souvent associées à une augmentation des caractéristiques mécaniques de l'acier employé, en particulier la limite d'élasticité. Mais une augmentation de la limite d'élasticité amplifie le phénomène de voilage.

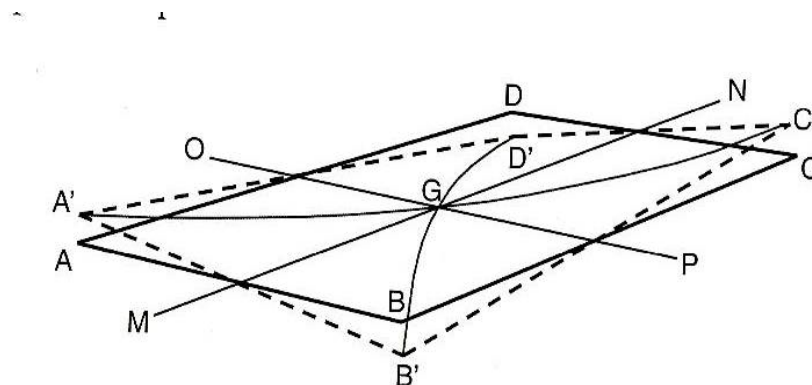
Il ya aussi l'automatisation qui rend les conséquences du voilage plus tangible car une pièce voilée est difficile a transférer d'un poste d'emboutissage au suivant.

Pour finir, une tendance actuelle dans l'électroménager est de réduire la quantité de métal sous serre flan, encore une fois pour diminuer la quantité de matière engagé et donc le prix. Cella aggrave les défauts de voilage. On voit donc que le problème a une grande importance, bien reconnue d'ailleurs par certains fabricants. La figure I.17 montre un panneau voilé (une porte de four à micro-ondes).



**Figure I. 17.** Porte de four à micro-ondes voilée

La figure I.18 montre schématiquement les déformations d'un panneau plan ABCD.



**Figure I. 18.** Les déformations quand un panneau plat se voile

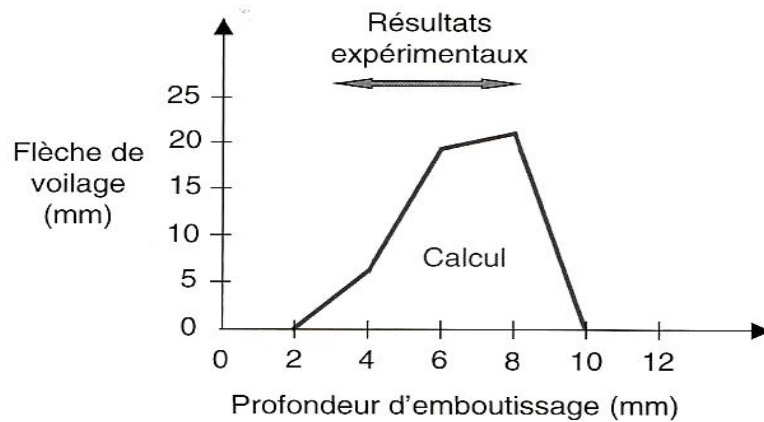
Pour résumer, le voilage ne résulte pas, comme on le croyait jusqu'à maintenant, des contraintes résiduelles existant dans la tôle à son état de livraison mais de celles qui y sont introduites par formage. C'est un phénomène de retour élastique qui résulte de tensions différentielles créées dans la pièce par l'emboutissage.

Ce n'est donc pas le retour élastique en lui-même qui est la cause du voilage mais la différence d'allongement de fibres qui peuvent être très faible.

Il est aussi à noter que les variations des caractéristiques mécaniques ou physique pouvant exister pour un même lot de matière peuvent compliquer les prédictions du voilage.

La conséquence de ces observations est importante : c'est que, bien que des lots de métal puissent donner lieu à un voilage tandis que d'autre ne le font pas. Ce n'est pas au niveau de la qualité du métal qu'il faut chercher des explications, mais au niveau du processus ou de la conception des pièces!

Par exemple, la profondeur d'un panneau rectangulaire avec bords tombés jouait un rôle prédominant sur le voilage comme l'indique la figure I.19.

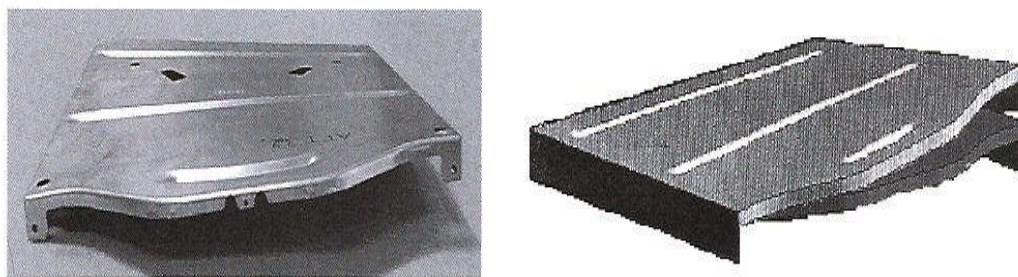


**Figure I. 19.** Variation de la flèche de voilage avec la profondeur

Il est donc tout à fait illusoire de vouloir régler les problèmes de voilage par une modification des spécifications de l'acier.

Cependant, on peut agir sur la conception des pièces notamment par la simulation numérique.

Exemple : il est démontré que la profondeur d'une pièce jouait un grand rôle, qu'une meilleure tenue du métal de la partie centrale pouvait suffire à éliminer le voilage comme le montre la figure I.20. Ou l'on voit à gauche une pièce voilée et à droite le résultat de la simulation numérique, parfaitement fidèle.



**Figure I. 20.** Pièce voilée (à gauche) et sa simulation numérique (à droite).

Enfin notons que si les secteurs les plus concernés sont ceux de l'électroménager. On rencontre le voilage partout où l'utilisation de grands panneaux est nécessaire.

**I.5.Conclusion**

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la présentation du pliage et de l'emboutissage à travers quelques généralités. Nous avons aussi défini les différentes tôles minces utilisées dans notre étude et leurs caractéristiques mécaniques, ces procédés conduisent à l'apparition de plusieurs défauts.

La caractérisation des matériaux passe par plusieurs essais mécaniques que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Figure I.1 : Principe de pliage .....	2
Figure I.2 : pliage en V.....	3
Figure I.3: pliage en l'air.....	3
Figure I.4 : pliage en frappe. ....	4
Figure I.5 : Pliage en U .....	4
Figure I. 6 : Opération de pliage d'une tôle. ....	4
Figure I. 7 : Retour élastique d'une tôle pliée. ....	5
<b>Figure I. 8:</b> Procédé d'emboutissage.....	6
Figure I.9 : a) emboutissage en expansion, b) emboutissage en retreint .....	6
Figure I.10 : L'emboutissage à froid.....	7
Figure I.11 : L'emboutissage à chaud.....	8
Figure I.12 : Positon des éprouvettes de traction par rapport à la direction de laminage $D_L$ de la tôle pour la mesure de coefficient d'anisotropie d'une tôle. ....	12
Figure I.13 : Exemple de déformées obtenues à la fin puis après l'étape d'emboutissage (simulation par élément finis).....	14
Figure I.14 : Indicateurs du niveau du retour élastique dans l'essai « Oméga ». ....	14
<b>Figure I.15 :</b> Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas).....	15
Figure I.16 : Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible). ....	16
Figure I. 17. Porte de four à micro-ondes voilée .....	17
<b>Figure I. 18.</b> Les déformations quand un panneau plat se voile .....	17
Figure I. 19. Variation de la flèche de voilage avec la profondeur .....	18
Figure I. 20. Pièce voilée (à gauche) et sa simulation numérique (à droite). ....	18

# **Chapitre II**

**Caractérisations mécanique et  
microstructural des aciers**



## **II.1- Introduction**

Le choix d'un métal pour un certain but d'utilisation, s'effectue sur la base de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques. Les essais mécaniques font partie de la technique des métaux, leur but est de caractériser ou d'évaluer numériquement les propriétés du matériau. La connaissance des grandeurs caractéristiques et leur détermination sont les conditions essentielles pour les calculs des dimensions des différents éléments de construction. Les grandeurs caractéristiques sont mesurables et sont définies selon les différents procédés qui feront l'objet de cette partie.

## **II.2. Essai de traction**

Les essais de traction permettent d'expliquer une partie des comportements mécaniques des matériaux. On distingue souvent deux groupes : ceux qui sont dits fragiles et ceux qui sont dits ductiles. Un matériau est dit fragile lorsque la rupture survient avant même d'entrer dans le domaine plastique. Un matériau qui présente un domaine élastique et un domaine plastique est dit ductile.

### **II.2.1. Principe de l'essai de traction**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction de façon progressive, généralement jusqu'à la rupture dans le but de définir une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

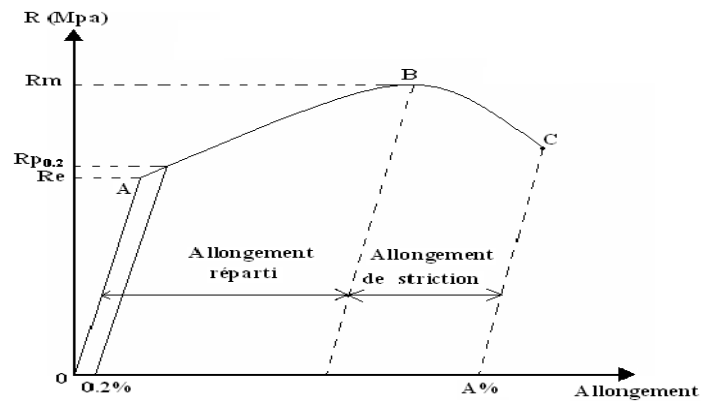
Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque. [16]



**Figure II. 1 : Principe de l'essai de traction**

### II.2.2 Courbe de traction

La courbe de traction est constituée de deux parties : une partie linéaire dite partie élastique et la deuxième est dite partie plastique.

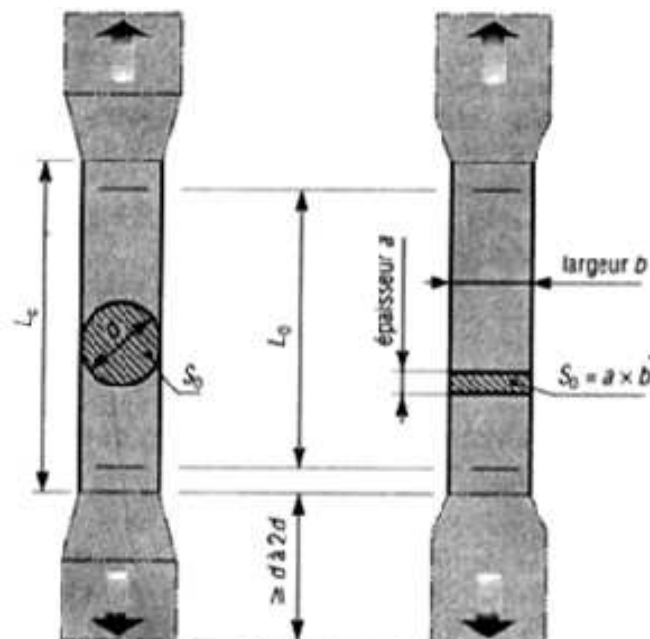


**Figure II. 2 :** Diagramme conventionnel d'un essai de traction

### II.2.3 Forme et dimensions de l'éprouvette

Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée de section constante comportant deux repères distants d'une longueur  $L$

La section droite de l'éprouvette peut être circulaire, carrée, rectangulaire ou hexagonale.



**Figure II.3 :** Forme générale de l'éprouvette de traction.

### II.2.4 Caractéristiques de l'essai de traction [17]

- **Limite élastique  $R_e$  :**

$$R_e = F_e / S_0 \text{ (Mpa)} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$R_e$  : limite d'élasticité apparente.

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

$S_0$  : section initiale ( $\text{mm}^2$ ).

- **Résistance à la traction**

Elle correspond à la charge la plus élevée du diagramme de traction, rapportée à la section initiale de l'éprouvette.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (Mpa)} \quad (\text{II.2})$$

$F_m$  : charge maximale.

- **Allongement à la rupture**

L'allongement à la rupture donne une valeur de l'aptitude du métal à la déformation plastique.

$$A\% = (L_u - L_0) / L_0 \times 100 \quad (\text{II.3})$$

$L_u$  : longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture

$L_0$  : longueur initiale de l'éprouvette.

- **Striction**

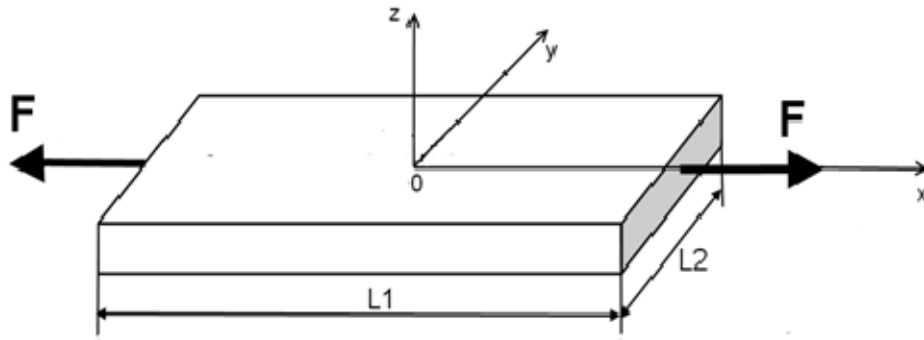
Le coefficient de striction :  $Z = S_0 - S_u / S_0 \times 100 \quad (\text{II.4})$

L'allongement de striction :  $Z_u = S_0 - S_u / S_u \times 100 \quad (\text{II.5})$

$S_u$  : est la section minimale de l'éprouvette après rupture

### II.2.5 Traction longitudinale [18]

La charge  $F$  est exercée suivant la direction de fibres (composite) ou bien suivant la direction de laminage (tôles) sur la section droite  $S_1$  du matériau (Figure II. 4).

**Figure II.4 : Traction longitudinale**

Ox : axe de laminage

Oy : axe perpendiculaire au sens du laminage

- Les contraintes normales  $\sigma_{xx}$  sont données par la relation suivante

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S_1} \quad (\text{II.6})$$

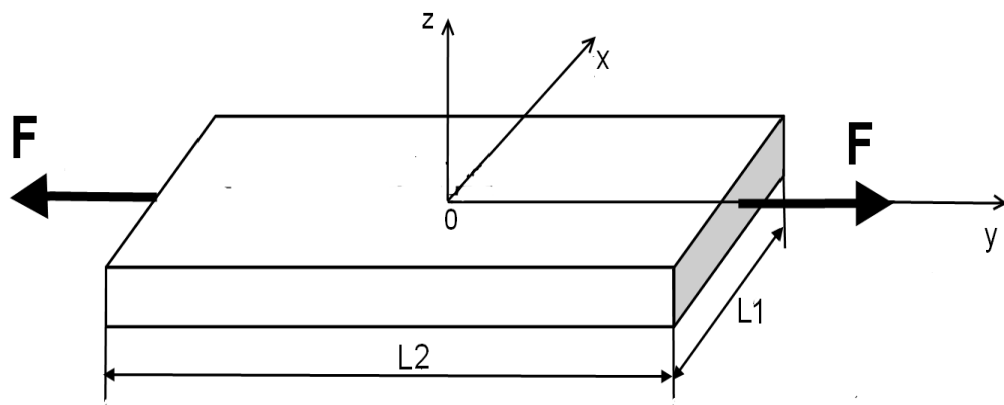
- Les déformations longitudinales et transversales sont respectivement données par :

$$E_L = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.7})$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.8})$$

### II.2.6 Traction transversale [18]

La charge  $F_2$  est exercée suivant la direction transversale au sens de laminage (figure. II.5)

**Figure II.5 : Traction transversale**

Ox : axe de laminage

Oy: axe perpendiculaire au sens de laminage

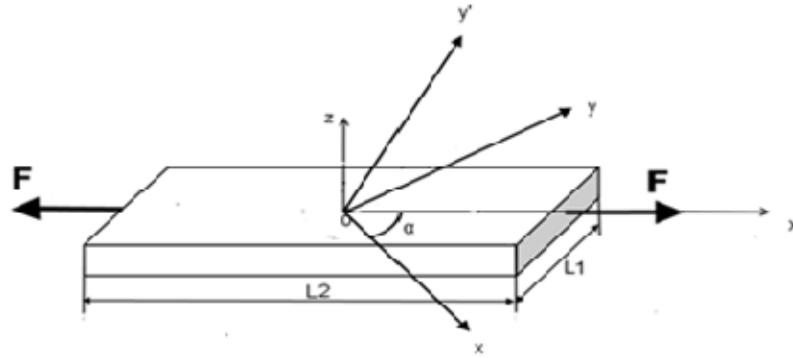
- La contrainte normale  $\sigma_{yy}$  est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_{yy} = \frac{F}{S_2} \quad (\text{II.9})$$

$S_2$  : est la section droite sur laquelle s'exerce la charge F

### II.2.7 Traction hors axe [18]

L'essai usuellement utilisé pour mesurer le module de cisaillement longitudinal G, est l'essai de traction orienté d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction de laminage. La charge F est exercée suivant la direction X' sur la section S comme la montre la (Figure. II.6)



**Figure II. 6** : Traction hors axe

Ox : axe de laminage

Oy : axe perpendiculaire au sens du laminage

Ox' : axe d'application de la charge F

$\alpha$  : angle entre la direction de la charge F et l'axe du laminage ( $45^\circ$ )

- Les contraintes normales  $\sigma_{X'X'}$  sont données par la relation suivante :

$$\sigma_{X'X'} = \frac{F}{S_3} \quad (\text{II.10})$$

$S_3$  : est la section droite sur laquelle exerce la charge F

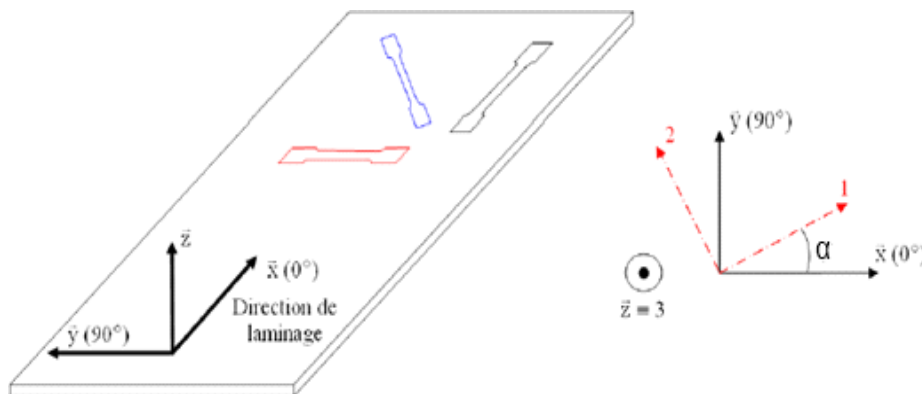
- Le module de Young dans la direction X' s'exprime par :

$$E_{X'X'} = E_{45} = \frac{\sigma_{X'X'}}{\epsilon_{X'X'}} \quad (\text{II.11})$$

### II.2.8 Mesure des coefficients de Lankford (anisotropie) [19]

Le comportement des tôles laminées varie souvent en fonction de la direction de sollicitation en raison de l'orientation préférentielle des grains imposés par le laminage. Dans ces conditions, elles sont dites anisotropes. Par ailleurs, cette anisotropie se caractérise généralement par trois plans de symétrie dont les intersections définissent les trois axes d'orthotrope (x, y, z) définis sur la (Figure II.7). L'orthotrope est une anisotropie particulière des tôles. La mesure des déformations pendant l'essai de traction permet également de mesurer les coefficients de Lankford qui tiennent compte de l'anisotropie initiale de la tôle. L'idée de base pour caractériser cette anisotropie, est de réaliser des essais de traction dans

Plusieurs directions. On introduit classiquement le coefficient de Lankford  $r_\alpha$  en fonction de l'orientation de découpage de l'éprouvette de traction notée  $\alpha$  et défini par rapport à la direction de laminage (Figure II. 7). En pratique, il est courant d'identifier les coefficients de Lankford  $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$  pour les trois orientations particulières  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport à la direction de laminage. Le coefficient de Lankford est le rapport entre la déformation latérale  $\varepsilon_{22}$  et la déformation dans l'épaisseur  $\varepsilon_{33}$  d'une éprouvette en traction uniaxiale.



**Figure II. 7 : Orientation des éprouvettes de traction**

- Le coefficient de Lankford est donné par la relation suivante:

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{zz}} \quad (\text{II.12})$$

$\varepsilon_{yy}$  : Déformation latéral

$\varepsilon_{zz}$  : Déformation suivant l'épaisseur

$\varepsilon_{zz}$  : est calculée grâce à l'hypothèse d'incompressibilité plastique du matériau :

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Ce qui donne :

$$\varepsilon_{zz} = -(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (\text{II.14})$$

Donc  $r_\alpha$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Gamma_\alpha = - \frac{\varepsilon_{yy}}{(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})} \quad (\text{II.15})$$

$\varepsilon_{yy}$  : est calculer à partir de coefficient de poisson.

### Remarque

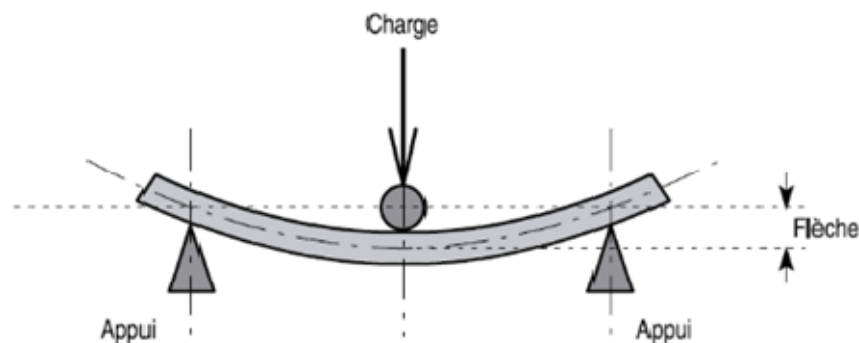
Les coefficients de Lankford sont généralement inférieurs à 1 pour les alliages d'aluminium, et supérieurs à 1 pour les aciers.

## II.3 Essais de flexion 3 points

Cet essai permet de caractériser des propriétés intrinsèques et extrinsèques du matériau étudié. Il est très facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple de l'échantillon), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles.

### II.3.1 Principe

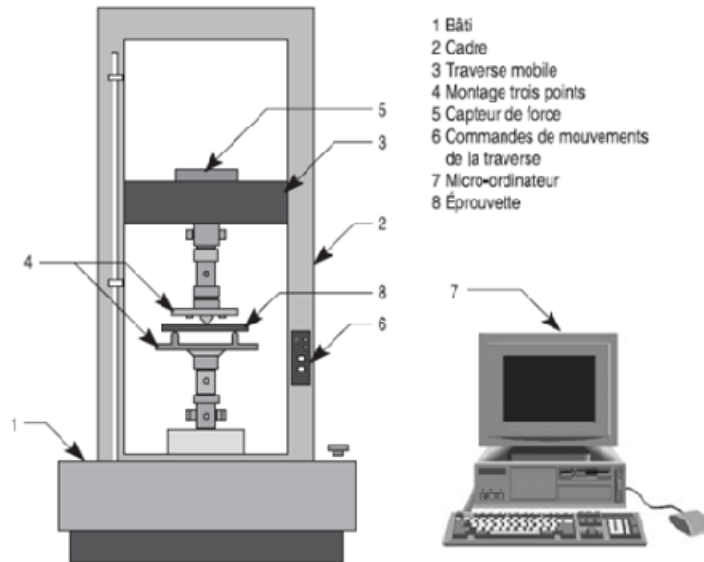
L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de effort à mi-distance des appuis. On impose une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.



**Figure II.8:** l'essai de flexion

### II.3.2 Machine de flexion

Une machine de flexion est constituée d'un rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée la base du montage de flexion sur laquelle repose l'éprouvette. La partie complémentaire du montage qui va appuyer sur l'éprouvette est fixée à une traverse mobile.



**Figure II. 9 : Machine de flexion.**

Dans l'essai de flexion, les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre ou elles sont nulles :

- D'un côté, elles sont en compression (côté concave de l'éprouvette)
- De l'autre, en tension

La valeur maximale de la contrainte pour un essai de flexion sur une éprouvette de section rectangulaire (b et h) et de longueur L est donnée par :

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{II.16})$$

La valeur maximale de la déformée (la flèche) est donnée par :

$$y_{\max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (\text{II.17})$$

Où I est le moment d'inertie de la poutre :

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{II.18})$$



## II.4 Essais de dureté [17]

### II.4.1 Définition

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. La pénétration met en jeu une série de facteurs dont les principaux sont: les déformations élastique et plastique, les frottements entre le pénétrateur, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui lui y appliquée.

### II.4.2 Principe de l'essai de dureté

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester. La charge appliquée est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est mou.

La dureté  $H$  s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = F/S \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$H$  : symbole de dureté (Mpa)

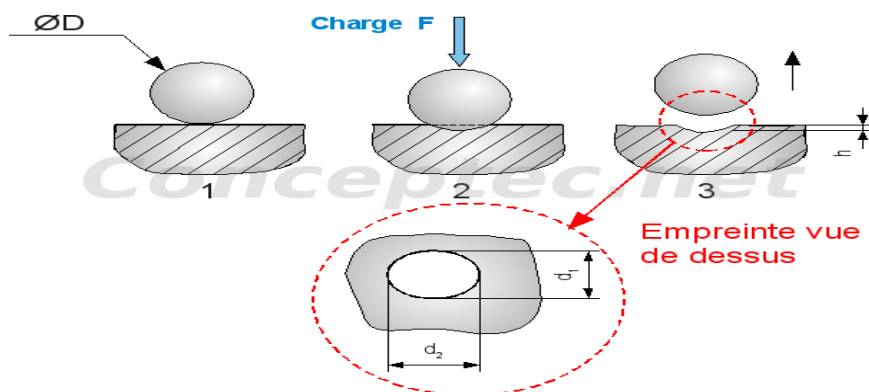
$F$  : charge d'essai (N)

$S$  : surface de l'empreinte ( $\text{mm}^2$ ).

### II.4.3 Types d'essai

#### II.4.3.1-Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre  $D$  sous une charge  $F$ , et à mesurer le diamètre  $d$  de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.



**Figure II.10:** Essai de dureté Brinell.

La dureté Brinell est donnée par la relation suivante:

$$HB = F / S \quad (II.20)$$

F: charge de l'essai (N)

$$S : \text{aire de l'empreinte (mm}^2\text{)} \quad S = \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (II.21)$$

D : diamètre de la bille (mm)

$$d : \text{diamètre de l'empreinte (mm)}. \quad d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (II.22)$$

#### II.4.3.1.1. Choix de la charge

Il existe un rapport de proportionnalité entre la charge et le diamètre de la bille

$$F = K * D^2 \quad (II.23)$$

Les valeurs de K sont en fonction du matériau à essayer.

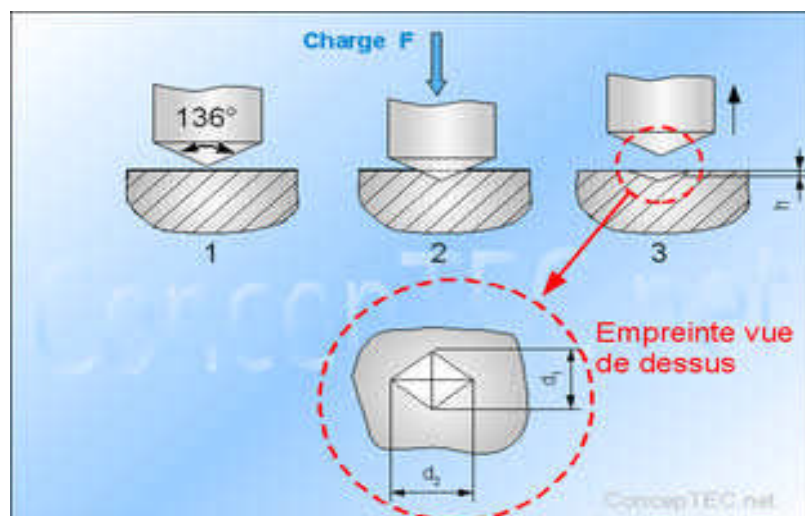
K = 30 pour les aciers,

K = 2,5 ou 10 pour l'aluminium et pour les alliages,

K = 5 ; 10 ou 30 pour le cuivre et ses alliages.

#### II.4.3.2. Essai Vickers

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous une charge F, et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. (Figure II.11)



**Figure II.11:** Principe de l'essai Vickers

La dureté Vickers est donnée par la relation suivante:

$$HV = F / S \quad (II.24)$$

La surface est calculée en fonction de la moyenne des deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$ .

$$S = d^2 / 2 \cdot \sin(\gamma / 2) \quad (II.25)$$

$\gamma$  : angle de la pyramide =  $136^\circ$

$d$  : diagonale de l'empreinte (mm).

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad (II.26)$$

On en déduit:

$$HV = 0,18544 F / d^2 \quad (II.27)$$

$F$  : charge d'essai (KN).

#### II.4.3.3. Essai Rockwell

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent  $h$  de la profondeur de pénétration.

##### II.4.3.3.1 Exécution de l'essai

Le pénétrateur étant perpendiculaire à la surface à essayer. Il est soumis sans chocs à une charge initiale de pénétration  $F_0$ . Cette charge entraîne une pénétration du pénétrateur, qui sert d'origine à mesurer la dureté. (Figure II.12)

On applique au pénétrateur, progressivement et sans chocs (en 2 à 8 secondes), une surcharge  $F_1$  qui entraîne un accroissement de pénétration  $b$  du pénétrateur.

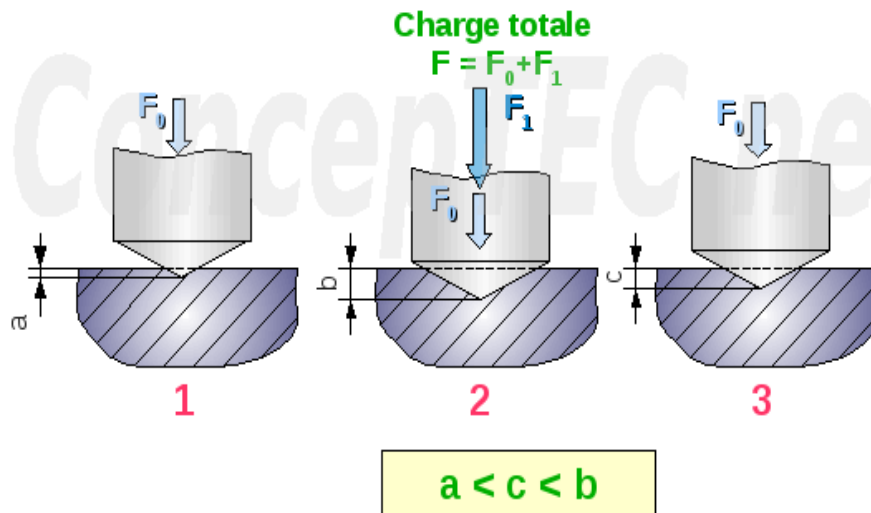
On enlève la surcharge  $F_1$  pour revenir à la charge initiale  $F_0$ . La pénétration du pénétrateur est alors égale à  $c$ .

On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration  $h$ , c'est à dire la différence entre la pénétration  $c$  sous charge  $F_0$  à la fin de l'essai et la pénétration  $a$  sous charge  $F_0$  au début de l'essai.

A partir de la valeur  $h$  est déduit le nombre appelé « dureté Rockwell », selon la formule :

$$\text{Dureté Rockwell} = N - (h / 0.002) \quad (II.28)$$

$N$  : dépend de l'échelle de dureté de l'essai Rockwell, exemple :



**Figure II.12:** Principe des essais Rockwell (HRB, HRC)

### II.5. Examen métallographique [20]

En microscopie, on utilise couramment les microscopes optiques et les microscopes électroniques. Ces instruments sont d'une grande utilité dans l'étude de la microstructure des matériaux.

La micrographie nécessite une préparation de l'échantillon à observer, cette préparation passe par plusieurs étapes à savoir :

- **Le prélèvement**

L'échantillon à prélever doit être représentatif des caractéristiques du produit à étudier (composition chimique, état métallurgique...). Ce prélèvement se pratique le plus souvent à la meule tronçonneuse ou à l'aide d'une scie en utilisant l'eau pour la lubrification. Cette lubrification est nécessaire afin d'éviter l'échauffement du matériau.

- **L'enrobage**

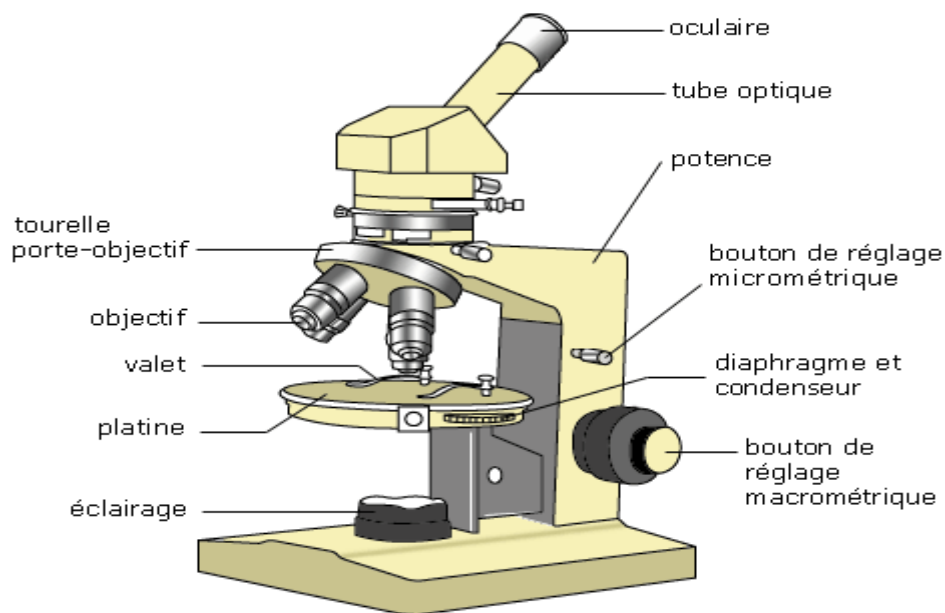
Pour faciliter la manipulation et permettre une meilleure conservation de l'échantillon, on procède à l'enrobage qui se fait à froid ou à chaud.

- **Polissage**

Le but du polissage est l'obtention d'une surface plane, brillante et exempte de toutes rayures. Il se fait par voie mécanique, chimique ou électrolytique.

- **Attaque chimique**

L'attaque des échantillons polis a pour but de révéler les joints des cristaux et de différencier les constituants (les précipités, les inclusions, les pores, les phases...etc.) de l'alliage. Il y a attaqué préférentielle ou coloration de certains constituants par rapport à d'autres, ce qui donne des différences de coloration entre les différents constituants ou entre les cristaux d'une même phase. Le tableau 2.représente les réactifs d'attaque métallographique de l'acier.



**Figure II.13:** Représentation schématique d'un microscope optique

## II.6. Essai de pliage

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de forme rectangulaire à une déformation plastique par pliage sans inversion du sens de flexion.



**Figure II.14:** Eprouvette pliée

L'essai nous permettra de contrôler à la fois l'adhérence du revêtement et l'élasticité de la peinture. Après l'essai de pliage, le revêtement ne doit pas présenter aucun écaillage visible à l'œil nu.

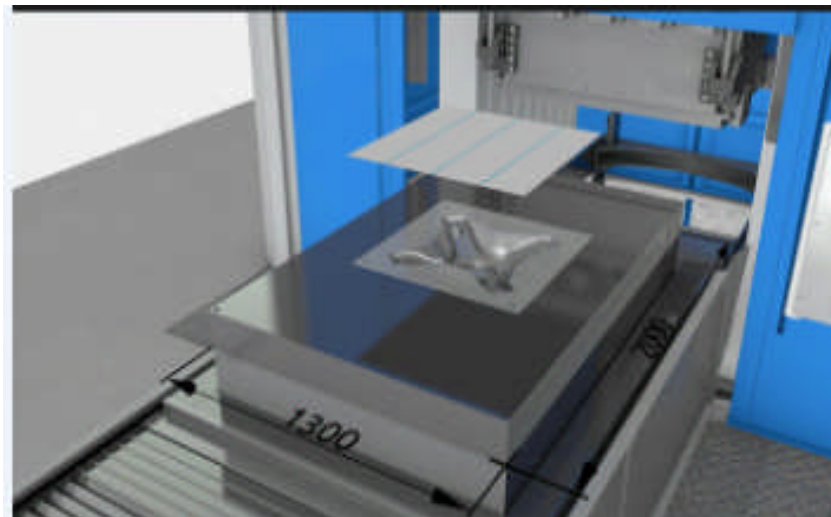
### **II.7. Essai d'emboutissage**

Le principe est fondé sur la déformation plastique de la tôle peinte. La déformation consiste en un allongement ou un retreint local de la tôle pour obtenir une empreinte.

Lors de l'opération de l'emboutissage, certaines mesures doivent être respectées :

- Positionner l'éprouvette sur la matrice ;
- Une fois que le serre flan est bien ajusté (remettre à 0), on applique une pression bien déterminée pour maintenir la tôle afin de lui permettre de fluer ;
- Avec un serrage manuel, on déforme la tôle peinte plastiquement avec le poinçon ;
- Le poinçon et le serre flan se relèvent, l'éprouvette conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

L'observation et l'interprétation se font sur la partie externe de l'empreinte de la tôle emboutie. [21]



**Figure II. 15.** Essai d'emboutissage sur une tôle.

**II.8. Conclusion**

L'ingénieur mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Elles sont indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme.

Figure II. 1 : Principe de l'essai de traction.....	20
Figure II. 2 : Diagramme conventionnel d'un essai de traction .....	21
Figure II.3 : Forme générale de l'éprouvette de traction. ....	21
Figure II.4 : Traction longitudinale .....	23
Figure II.5 : Traction transversale .....	23
Figure II. 6 : Traction hors axe.....	24
Figure II. 7 : Orientation des éprouvettes de traction.....	25
Figure II.8: l'essai de flexion .....	26
Figure II. 9 : Machine de flexion.....	27
Figure II.10: Essai de dureté Brinell. ....	28
Figure II.11: Principe de l'essai Vickers .....	29
Figure II.12: Principe des essais Rockwell (HRB, HRC) .....	31
Figure II.13: Représentation schématique d'un microscope optique .....	32
Figure II.14: Epreuve pliée .....	32
Figure II. 15. Essai d'emboutissage sur une tôle revêtue .....	33



II.1- Introduction .....	20
II.2. Essai de traction.....	20
II.2.1. Principe de l'essai de traction .....	20
II.2.2 Courbe de traction.....	21
II.2.3 Forme et dimensions de l'éprouvette.....	21
II.2.4 Caractéristiques de l'essai de traction [17] .....	22
II.2.5 Traction longitudinale [18] .....	22
II.2.6 Traction transversale [18] .....	23
II.2.7 Traction hors axe [18] .....	24
II.2.8 Mesure des coefficients de Lankford (anisotropie) [19].....	25
II.3 Essais de flexion 3 points .....	26
II.3.1 Principe .....	26
II.3.2 Machine de flexion .....	27
II.4 Essais de dureté [17].....	28
II.4.1 Définition .....	28
II.4.2 Principe de l'essai de dureté .....	28
II.4.3 Types d'essai.....	28
II.4.3.1-Essai Brinell .....	28
II.4.3.2. Essai Vickers .....	29
II.4.3.3. Essai Rockwell .....	30
II.5. Examen métallographique [20] .....	31
II.6. Essai de pliage .....	32
II.7. Essai d'emboutissage.....	33
II.8. Conclusion .....	34

# **Chapitre III**

## **Etude expérimentale**

### III.1 Introduction

L'expérience est le complément essentiel à la théorie et représente l'argument de toutes les questions du comportement mécaniques des aciers avant (ébauche) et après (produite finis). Dans cette étape on a pu faire une série d'expérience (analyse chimique, traction, Dureté et Flexion) sur des éprouvettes plates. Les résultats sont enregistrés et commentés.

### III.2. Matériau étudié

Dans ce travail, on a utilisé des aciers décarburés émaillables de nuances **NF EN 10209 DC04 EK, m**. Il s'agit de tôle laminée à froid en acier extra doux pour émaillage conventionnel utilisé couramment pour la fabrication des cuisinières. L'aspect de surface est bon et qualifié par la lettre m.

La composition chimique des aciers décarburés utilisés dans notre étude est répertoriée dans le tableau III.1. Cette composition chimique est réalisée à l'aide de la technique de spectrométrie à émission optique.

Composition chimique en % massique sur coulée			
C	Mn	P	S
0.08	0.5	0.03	0.08

**Tableau III. 1:** Composition chimique en % massique

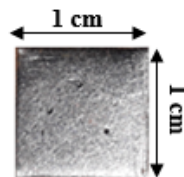
Les différentes caractéristiques mécaniques des aciers utilisés sont répertoriées dans le tableau. III.2.

Ep (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A80 (%)
0.5-0.7	140-240	270-350	34
0.7-3.0	140-220		36

**Tableau III. 2 :** Caractéristique mécanique des aciers.

### III.3 Etude métallographique

Les échantillons sont découpés sous forme parallélépipédique de 1 cm de longueur, et 1cm de largeur.

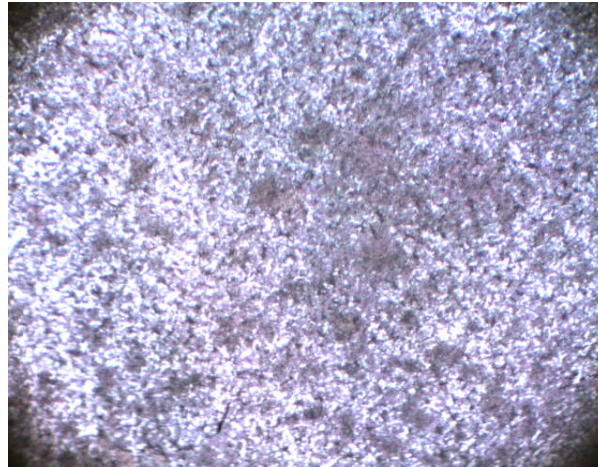


**Figure III. 1:** Echantillon sous forme parallélépipédique

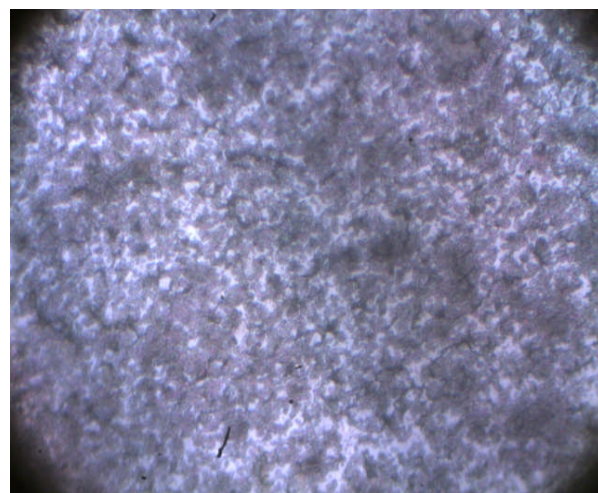
La première opération consiste à polir la surface qu'on veut observer pour la rendre plane en utilisant une polisseuse sur laquelle sont montés les papiers abrasifs des différents grades (de 800 au 1200). L'opération de finition est réalisée avec un feutre disposé sur le plateau de la polisseuse est imbibé par une solution d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dilué dans  $\text{H}_2\text{O}$ .

La deuxième opération consiste à attaquer chimiquement les échantillons à l'acide oxalique (10g de  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_4$  et 100ml  $\text{H}_2\text{O}$ ). Nous injectons la solution sur la surface polie, avec un temps maintien de 2 à 5 seconds suivi d'une opération de nettoyage à l'eau et séchage par flux d'air sur la surface traitée.

L'observation micrographique est réalisée avec un microscope métallographique de type « OLYMPUS PME3 », équipé d'un système de prise des photos avec un grossissement de 200 et 400 fois.



**Figure III.2 :** microstructure de l'acier DC04 EK (gx200).



**Figure III.3:** microstructure de l'acier DC04 EK (gx400).

Les figures ci-dessus représentent la micrographie de la tôle de l'acier utilisée au sein de l'entreprise ENIEM, après une attaque chimique.

Le DC04 EK a 0.08 de carbone, est un acier hypoeutectoides d'une structure composé de ferrite et perlite.

### III.4. Essais mécaniques

#### III.4.1. Essai de dureté

Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide des duromètres de type « WOPERT DIA TESROR RC » (figure III.4), constitué de deux pratiques :

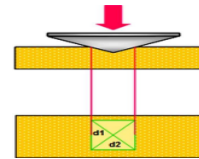
- La première permet d'effectuer l'essai de type VIKERS qui consiste à appliquer une charge avec un pénétrateur en forme de pyramide a base carrée.
- La deuxième permet de mesurer l'empreinte de la pyramide avec un agrandissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli.



**Figure III.4:** Duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC ».

Nous avons réalisé les essais de dureté Vickers (HV) sur l'échantillon de l'acier. Une filiation de trois mesures de dureté pour chaque état a été réalisée. La valeur moyenne est ensuite calculée. La formule qui permet de calculer la dureté (HV) est la suivante :

$$HV = 1.8544 \times \frac{F}{D^2} \quad (\text{III.1})$$



Avec :

F : la charge appliquée (15KN)

D : diagonale (moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ ) de l'empreinte en mm.

Le tableau III.3. Résume les valeurs trouvées.

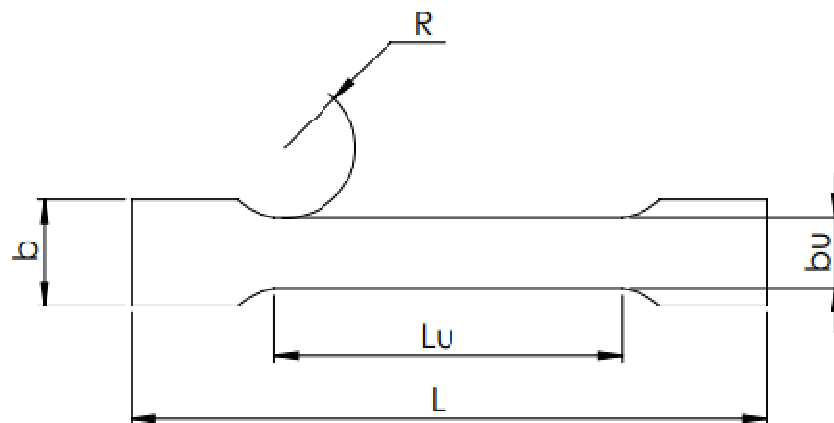
Essai	1	2	3	Moyenne
Etat recuit	79.900	82.687	85.614	82.733

**Tableau III. 3 :** Résultats des essais de dureté Vickers (HV) de l'acier.

### III.4.2. Essais de traction

Les essais de traction sont réalisés afin de caractériser le comportement mécanique de notre matériau. Les éprouvettes ont été découpées par électroérosion dans une tôles d'épaisseur 0.8mm suivant trois directions de laminage  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  de la direction de laminage et a  $90^\circ$  de la direction de laminage.

Dans notre cas, nous avons utilisé la norme **NF EN 10209 DC04 EK, m**. Les dimensions de l'éprouvette sont données sur la figure III.5 :



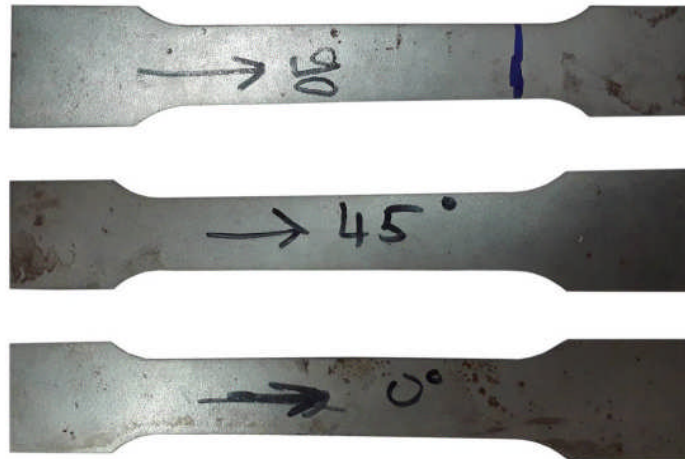
**Figure III.5:** Eprouvette de traction normalisée selon la norme NF EN 10209 DC04 EK, m

Avec

- **L** = longueur totale de l'éprouvette = 180mm
- **b** = largeur de l'éprouvette = 30mm

- $e$  = épaisseur = 0.8mm
- $L_u$  = longueur utile de l'éprouvette = 80mm
- $b_u$  = 20mm
- $R$  = rayon de courbure = 20mm

Les éprouvettes sont découpées suivant 3 directions par rapport à la direction de laminage à l'Entreprise National Industriel Electroménager (ENIEM).



**Figure III.6:** Les éprouvettes selon les trois directions.

Les essais de traction ont été réalisés à l'unité de recherche de l'université Boumerdès sur une machine Zwick assisté par ordinateur. L'éprouvette est maintenue entre deux mors qui sont fixés sur la traverse de la machine par des tiges.



**Figure III. 7 :** Machine de traction Zwick/ Roell Z250

L'essai de traction a été réalisé dans les mêmes conditions :

- Température ambiante : 25°.
- Vitesse de déformation : 4 mm/min.

#### III.4.2.1. Les résultats des essais de traction : Courbe conventionnelle

Les résultats des essais de traction selon les trois directions d'orthotropie de la tôle sont présentés dans les tableaux suivants. Nous rappelons que ces directions sont inclinées 0°, 45° et 90°.

N° d'éprouvette	DL	Module de Young (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e</sub> (MPa)
<b>Acier extra doux NF EF 10209</b>				
<b>1</b>	0°	206200	305.57	161.80
<b>2</b>	0°		289.78	166.29
<b>3</b>	0°		289.67	195.46
<b>4</b>	45°	223500	284.47	176.67
<b>5</b>	45°		262.80	149.33
<b>6</b>	45°		295.30	176.99
<b>7</b>	90°	218800	256.53	156.30
<b>8</b>	90°		230.47	153.47
<b>9</b>	90°		300.05	148.43

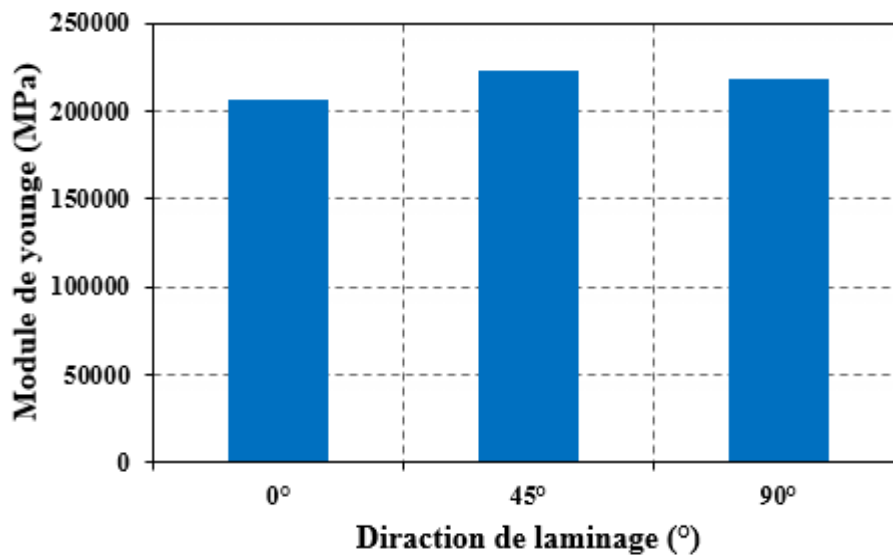
**Tableau III. 4:** Valeurs numériques des caractéristiques de résistance.

A partir des résultats des essais de traction nous calculons les valeurs moyennes. Les caractéristiques moyennes sont présentées sur le tableau suivant :

Direction	E (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e</sub> (MPa)
<b>0°</b>	206200	295.00	174.51
<b>45°</b>	223600	280.85	167.66
<b>90°</b>	218800	262.35	152.73

**Tableau III. 5 :** Caractéristiques mécaniques de l'acier NF EN 10209

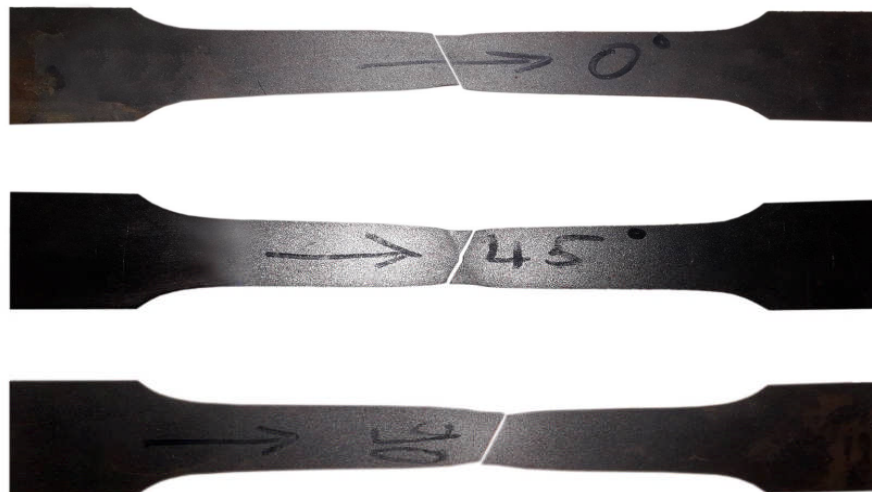




**Figure III.8 :** valeur moyenne de module de Young selon les tris direction.

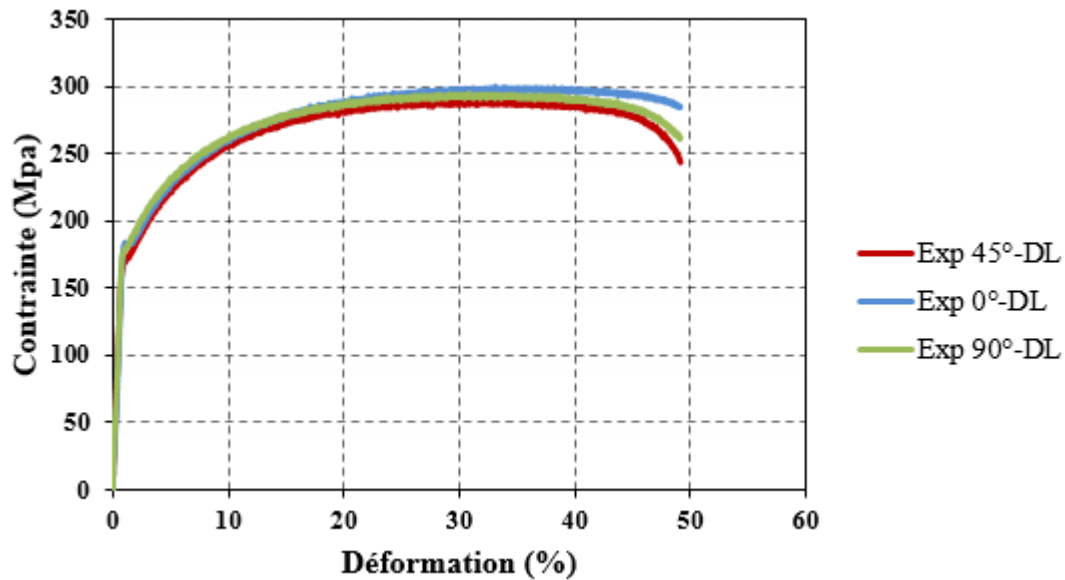
Les résultats expérimentaux montrent que les caractéristiques de résistances des tôles sont différentes pour les trois directions par rapport au sens de laminage. La résistance à la rupture est plus élevée selon la direction de laminage, puis 45° par rapport à la direction de laminage et plus faible selon la direction de incliné de 90°.

La figure (III.9) montre la rupture des éprouvettes selon les trois directions après essai de traction.

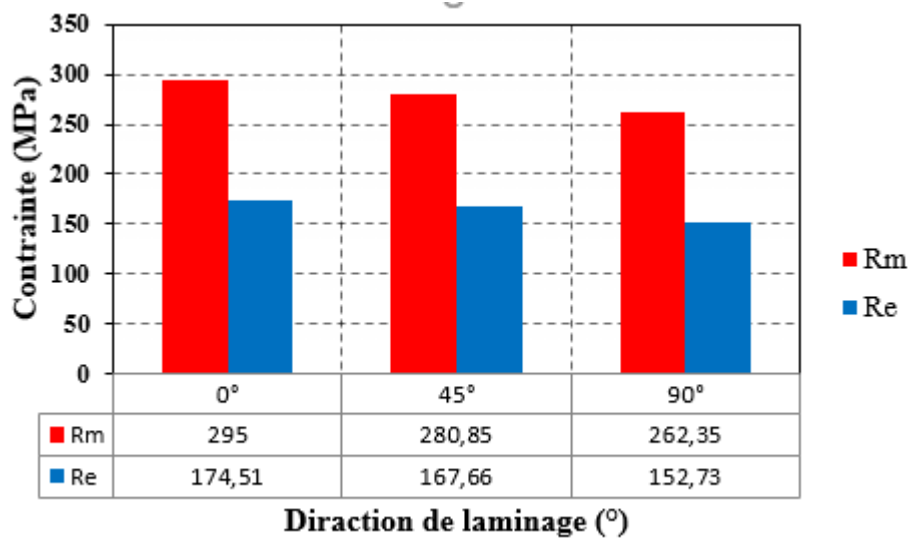


**Figure III.9:** Rupture des éprouvettes selon les trois directions 45°, 90° et 0°.

Les résultats obtenus lors des essais de traction sur les trois directions ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) sont donné par les courbes ci-dessous :



**Figure III.10:** Superposition des courbes de traction.




**Figure III.11:** caractéristiques mécaniques de l'acier NF EN 10209

Nous constatons que dans le domaine élastique les trois courbes se superposent, tandis que dans le domaine plastique un écart apparaît entre les courbes. Nous expliquons cette variation par le comportement anisotrope du matériau.

### III.4.2.2. Caractérisation de l'orthotropie

Les résultats de calcul des caractéristiques de l'orthotropie sont présentés dans les tableaux suivants :

Numéro d'éprouvettes	Longueur initiale Li (mm)	Longueur finale Lf (mm)	Largeur initiale bi (mm)	Largeur finale bf (mm)	Coefficient d'anisotropie r°		r̄	
					r°	Moyenne r°		
1	180	222	20	12.5	1.74	1.68	1.86	0.085
2	180	222	20	12.2	1.68			
3	180	217	20	12.1	1.66			
4	180	219	20	12.3	1.68	1.78		
5	180	218	20	12.8	1.76			
6	180	219	20	13.3	1.90			
7	180	219	20	13.8	2.31	2.22		
8	180	221	20	13.5	2.16			
9	180	220	20	14	2.18			

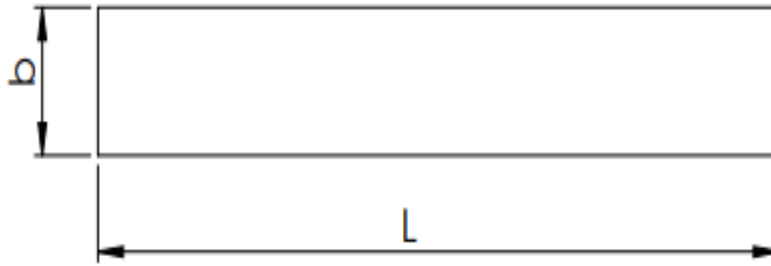
**Tableau III. 6:** Les valeurs calculées des coefficients d'anisotropies.

La constitution anisotropie du matériau. Est étroitement liée à l'hétérogénéité de sa microstructure, son comportement mécanique est anisotrope. Cette anisotropie évoluera avec la déformation qui modifie l'organisation de la microstructure.

### III.4.3 Essai de flexion

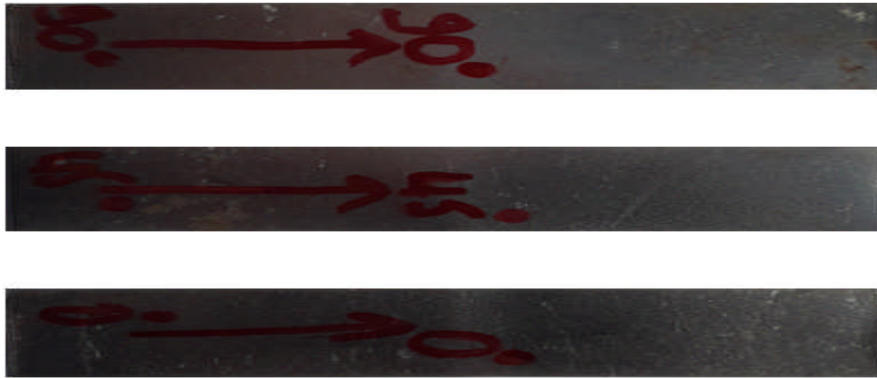
Pour les besoins de notre étude nous avons opté pour l'essai de flexion trois point (figure : II.8). L'essai consiste à déformer des éprouvettes parallélépipédiques reposantes sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante (dans notre cas 4 mm/min) dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux telle que le module de Young.

Dans notre cas, nous avons utilisé la norme **NF EN 10209 DC04 EK, m.** les éprouvettes sont normalisées comme suite :



**Figure III.12:** Epreuve de flexion normalisée selon la norme NF EN 10209 DC04 EK, m  
Avec

- **L** : longueur de l'éprouvette = 100mm
- **b** : largeur de l'éprouvette = 20mm



**Figure III.13:** Les éprouvettes avant déformation selon trois directions.



**Figure III.14:** Dispositif d'essai et dimension de flexion trois points.

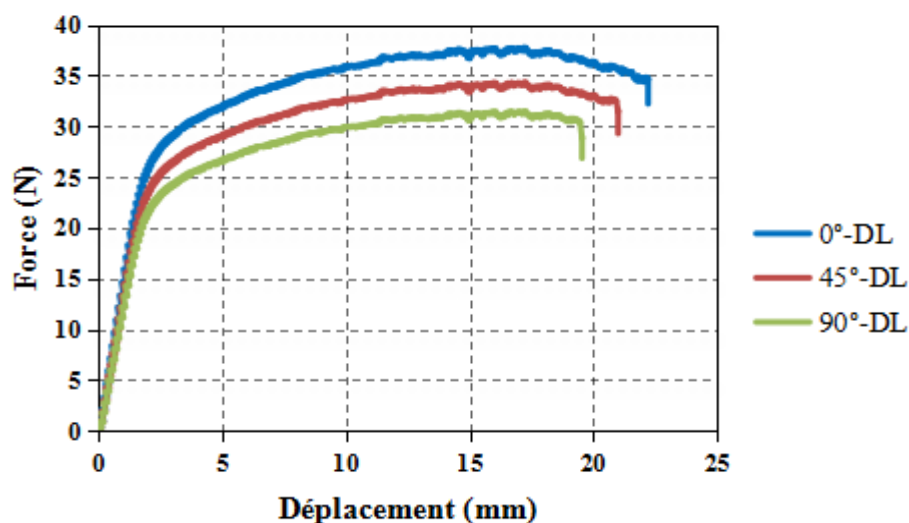
Les essais de flexion trois points sont réalisés sur la machine de flexion **Zwick/ Roell Z250** (figure III.14), au niveau de l'unité de recherche : Matériaux, procédé et environnement à l'université de Boumerdès. La Zwick / Roell Z250 est une machine automatique à commande électrique connectée à un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données.

La force maximale de cette machine est de 50000 N et sa vitesse maximale peut aller jusqu' à 500 mm/min. Elle est constituée de deux traverses ; l'une fixe l'autre mobile, guidées par deux colonnes. La courbe obtenue est la force (N) en fonction du déplacement (mm). Nous avons effectué des essais de flexion à une même vitesse qui est de 4mm/mn.

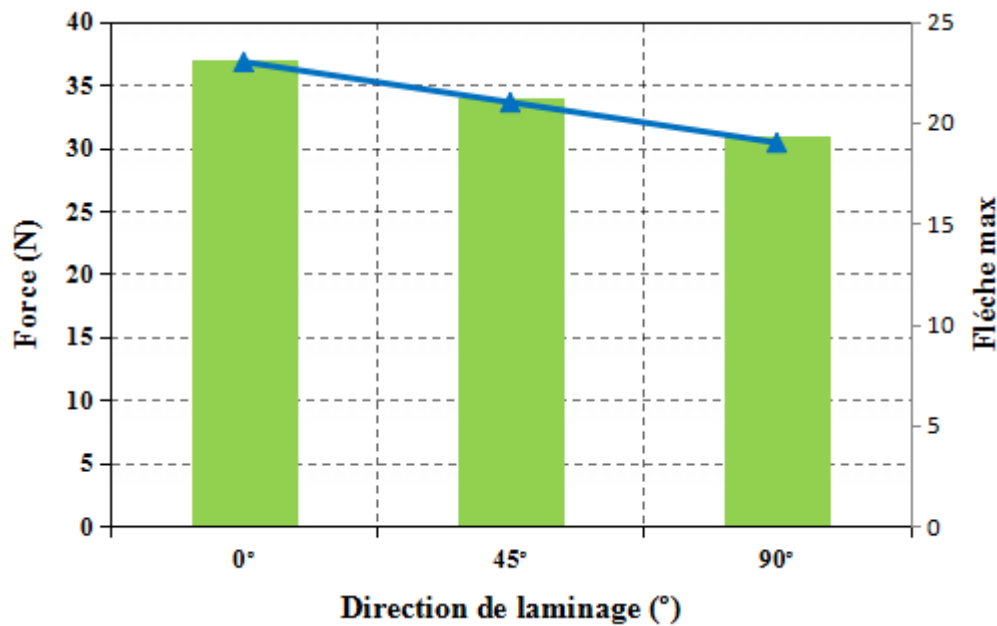
Les figures ci-dessous montrent les résultats de la variation de la contrainte en fonction de la déformation selon les trois directions de laminage.



**Figure III.15:** les éprouvettes après l'essai de flexion selon les trois directions.



**Figure III.16:** Superposition des courbes de flexion



**Figure III.17:** l'évolution force max/ flèche max des éprouvettes selon les trois D/L

Nous remarquons sur les figures (III.16 et III.17) que la force nécessaire pour fléchir l'éprouvette est plus importante découpée dans la direction de laminage, puis l'éprouvette 45°/DL et en fin pour l'éprouvette 90°/DL.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude expérimentale sur une tôle en acier **NF EN 10209 DC04 EK, m**, dans le but d'obtenir les principales caractéristiques mécaniques du matériau.

Nous avons d'abord présenté la composition de ce matériau. Puis nous avons réalisé une base de données expérimentale, constituée d'essais de traction et de flexion selon la direction de laminage, 45° par rapport à la direction de laminage et 90° par rapport à la direction de laminage.

L'influence de la direction sur les caractéristiques du matériau a été mise en évidence dans les essais.

Dans tous les cas, il a été démontré que les caractéristiques sont meilleures suivant la direction de laminage, et sont les plus faibles suivant la direction 90°/DL.

Les simulations numériques avec le logiciel ABAQUS feront l'objet de notre travail dans le prochain chapitre pour comparée les résultats obtenus avec ABAQUS avec les résultats expérimentaux.

Tableau III. 1: Composition chimique en % massique .....	35
Tableau III. 2 : Caractéristique mécanique des aciers.....	35
Tableau III. 3 : Résultats des essais de dureté Vickers (HV) de l'acier NF EN 10209.....	38
Tableau III. 4: Valeurs numériques des caractéristiques de résistance. ....	40
Tableau III. 5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier NF EN 10209 .....	40
Tableau III. 6: Les valeurs calculées des coefficients d'anisotropies. ....	43

# **Chapitre IV**

## **Simulation numérique**



### IV.1. Introduction




Dans ce chapitre, nous présentons les résultats numériques obtenus avec le logiciel ABAQUS. Nous présentons d'abord le logiciel, puis les simulations numériques de traction et flexion avec des comparaisons expérimentant. A la fin de ce chapitre traiterons de l'emboutissage et de voilage de tôle.

### IV.2. Généralité sur le code de calcul ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. ABAQUS compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.



#### a) ABAQUS/Standard

ABAQUS Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite [18].

-  Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks
-  Problèmes linéaires et non linéaires
-  Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

#### b) ABAQUS/Explicit

ABAQUS/ Explicite Un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

-  Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle)
-  Problème transitoire et dynamique des structures

#### c) ABAQUS/CAE

ABAQUS /CAE Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

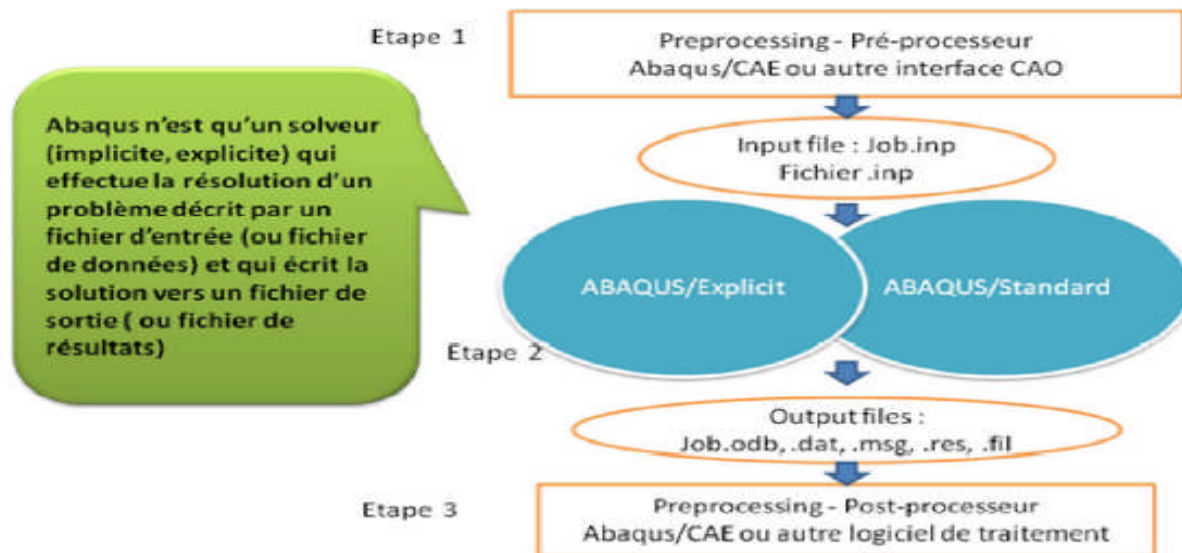


Figure IV. 1 : Structure d'une analyse sous Abaqus [18].

### IV.2.1. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus

#### IV.2.1.1. Fichier d'entrée (Input file) : Extension.inp

Contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée

#### IV.2.1.2. Fichier de résultats (output file) : Extension.odb

Contient les contours et courbes de résultats

### IV.2.2. Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation

- Fichier **.com** : exécutable de vos calculs
- Fichier **.res** : fichier binaire de reprise
- Fichier **.dat** : liste des résultats, résumé de votre modélisation
- Fichier **.msg** : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur
- Fichier **.fil** : fichier binaire des résultats
- Fichier **.log** : fichier de procédure
- Fichier **.sta** : Fichier statistique

### IV.2.3. Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement)

Il est important de savoir que le module CAE est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques [19].

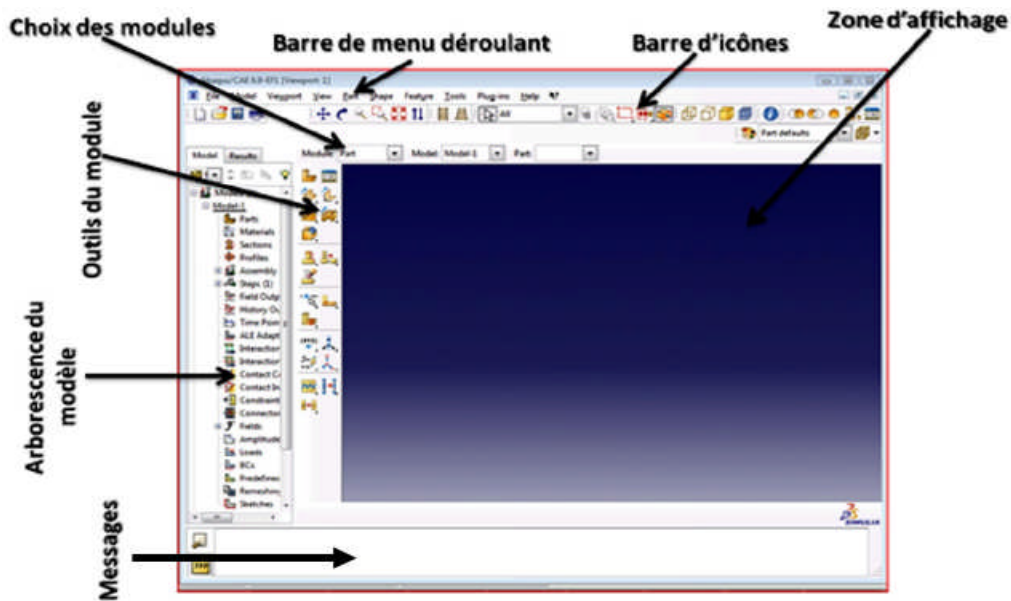


Figure IV. 2 : Organisation d'Abaqus [19]

#### IV.2.4. Les modules

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules [20].

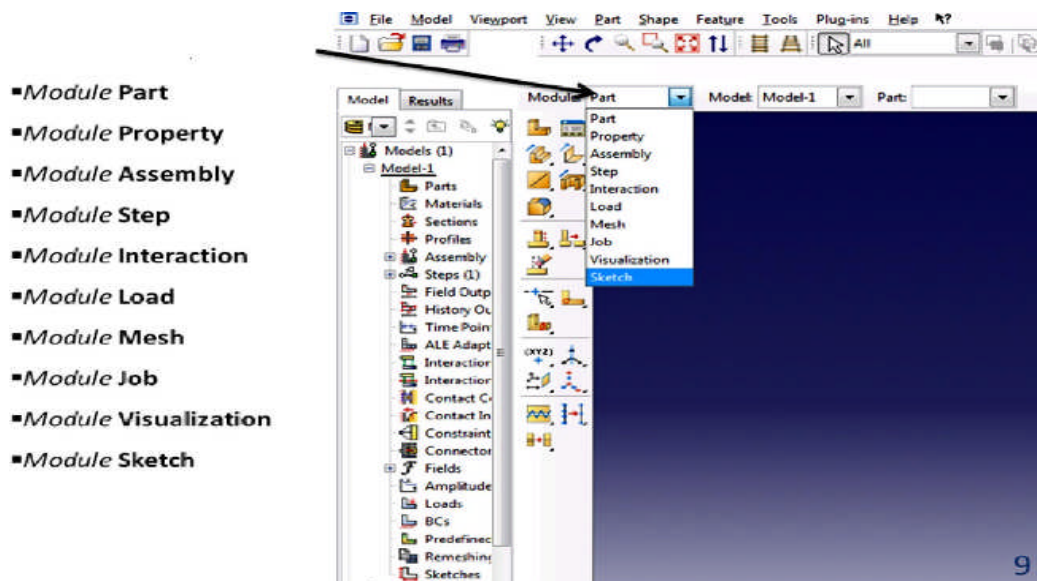


Figure IV.3: Réalisation de la mise en données d'un problème

##### a) Module part

PART ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle.

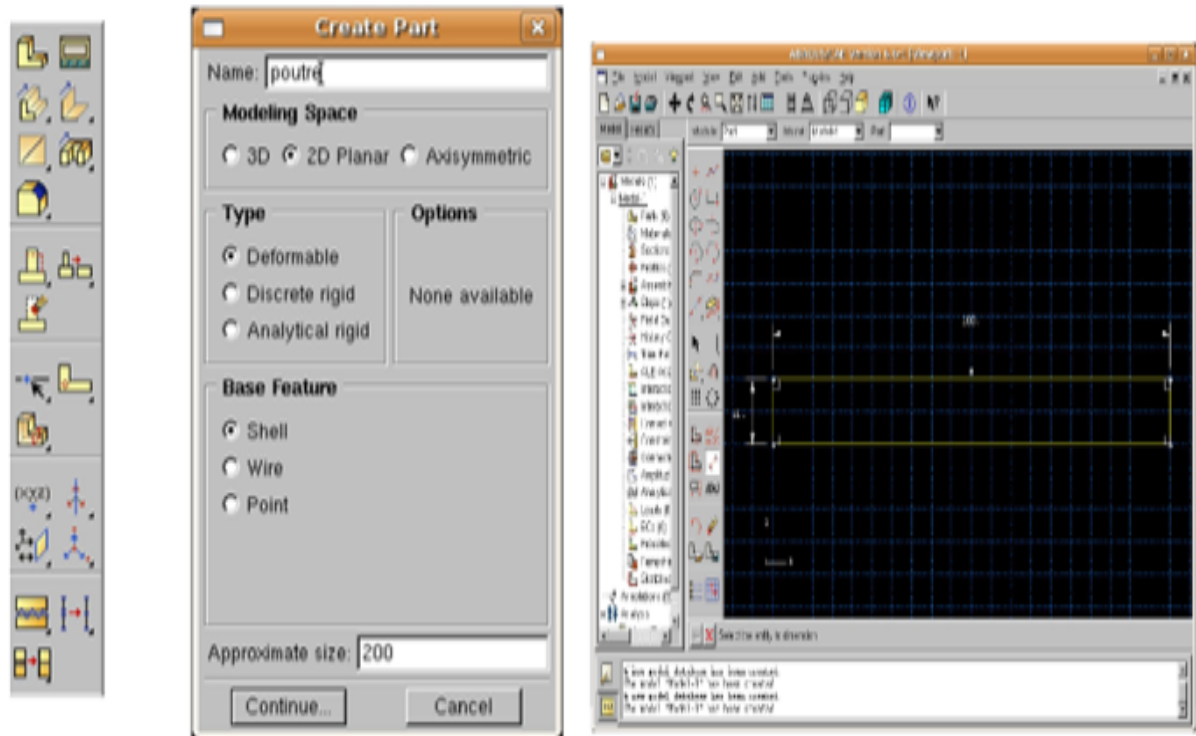


Figure IV.4: Module Part

### b) Module Property

On y définit les propriétés du ou des matériaux (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire.

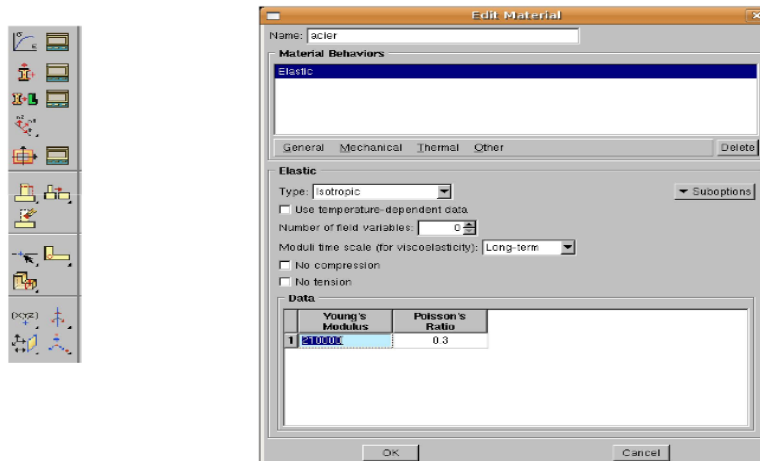


Figure IV.5: propriété Matériaux et section

### c) Module Assembly

Il s'agit de créer une instance figure IV.6 à partir des entités que vous avez définies dans le module Part. Ces instances seront celles que vous manipulerez par la suite dans le modèle.

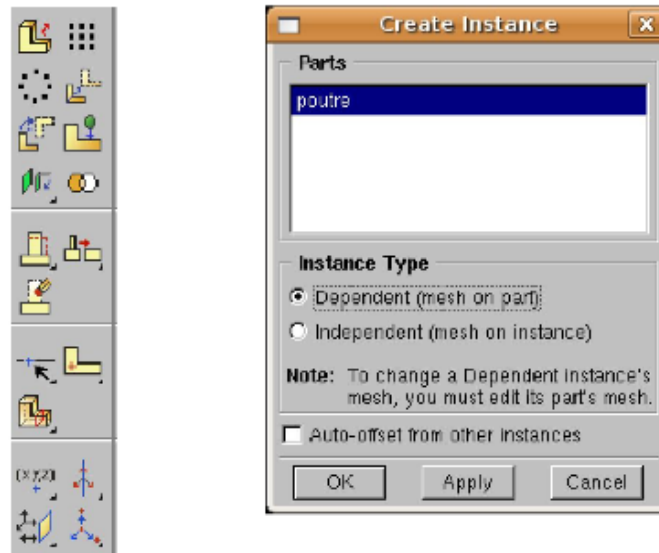


Figure IV.6: Instance et assemblage

### d) Module Step

C'est ici que vous choisirez, figure IV.7 dans le cas d'études de crash ou d'impact, le module « Dynamic explicit ». Vous remarquerez au passage les nombreuses autres possibilités qui offertes par ce code de calcul

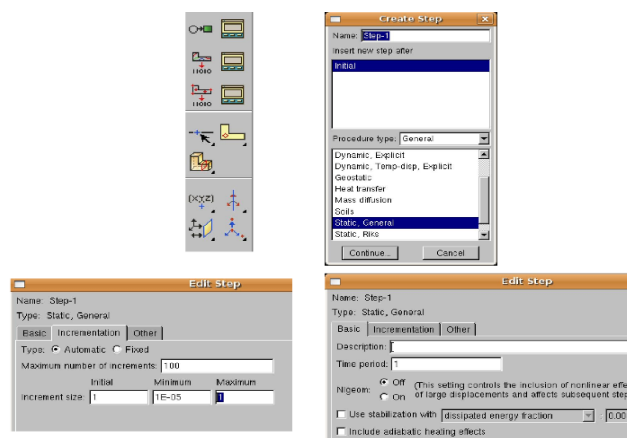


Figure IV.7: Création de step

### e) Module Interaction

Grâce 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.

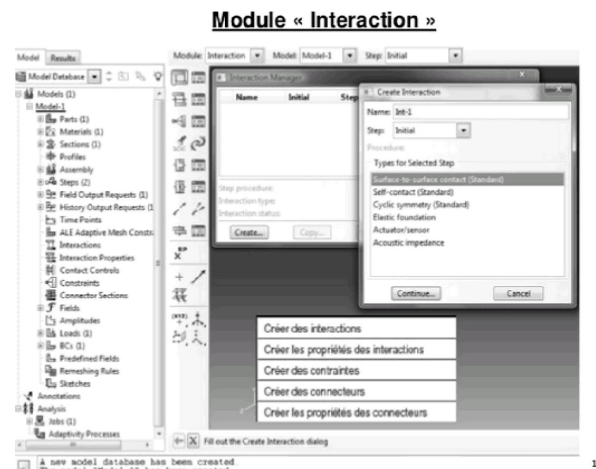


Figure IV.8: interaction

### f) Module Load

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs.

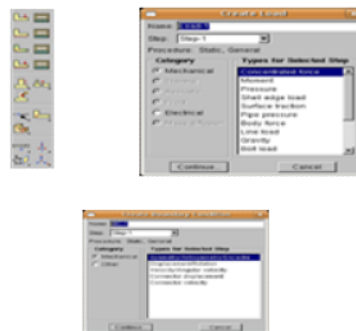


Figure IV.9: Création des chargements

### g) Module Mesh

Mesh contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage, figure IV.10.

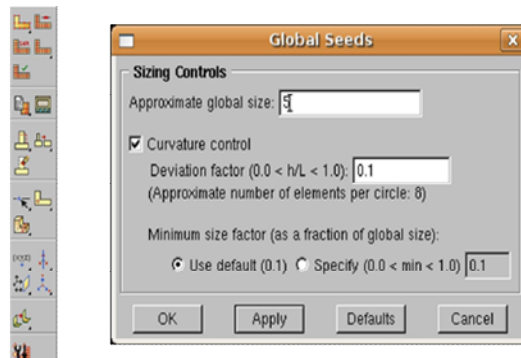


Figure IV.10: Création de maillage

### h) Module JoB

Le « lancement » du calcul est classique. Figure IV.11, Après avoir lancé le calcul, vous pouvez suivre l'évolution du procès en cliquant sur Monitor.

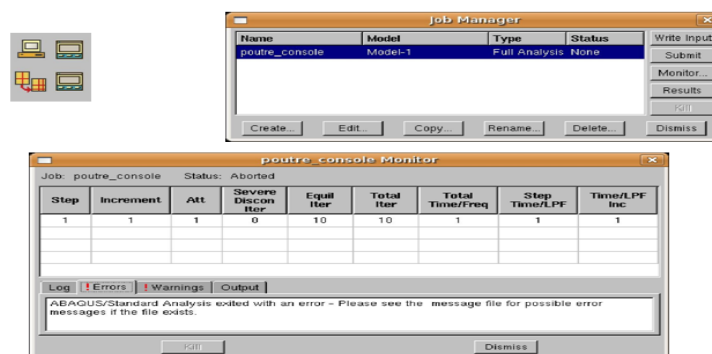


Figure IV.11: Lancement de calcul

### i) Module visualisation

Visualisation Est un module qui affiche tous les résultats de la pièce soit contrainte ou déformation, figure IV.12.

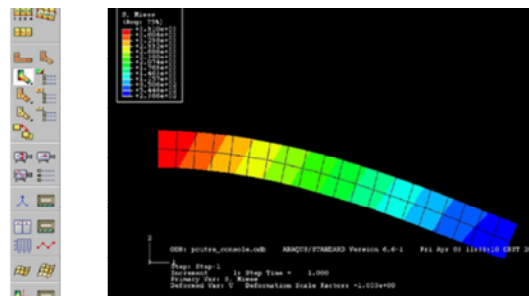


Figure IV.12: Affichage des résultats [21].

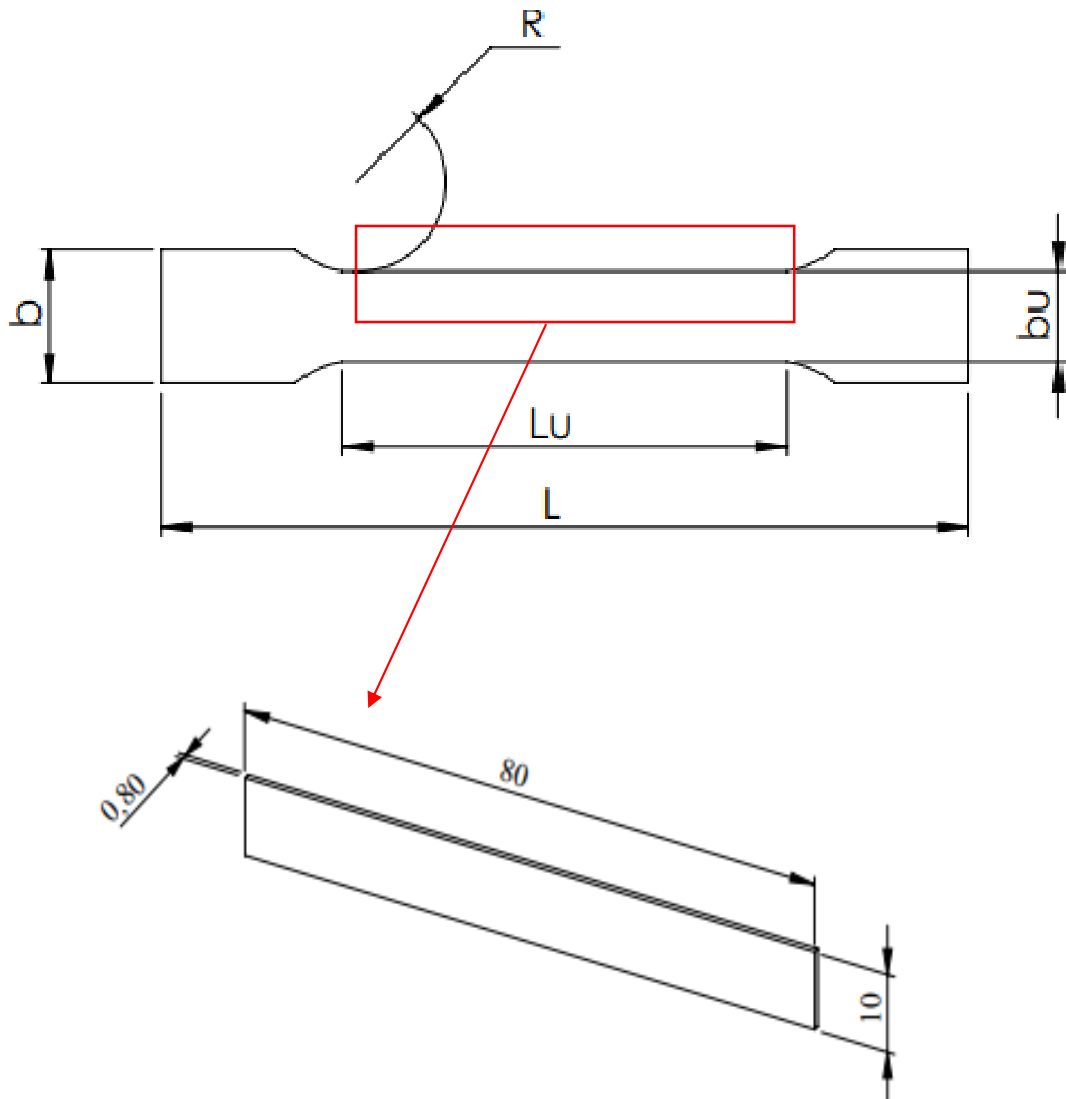
**j) Module sketch**

Sketch permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet.

Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple

**IV.3. Simulation de l'essai de traction**

La figure (IV.13) présente les dimensions de la partie utile l'éprouvette sur ABAQUS avec les dimensions en mm. Par effet de la symétrie, la moitié de l'éprouvette est simulée. Cette démarche va nous permettre de minimiser d'avantage la durée de la somation.

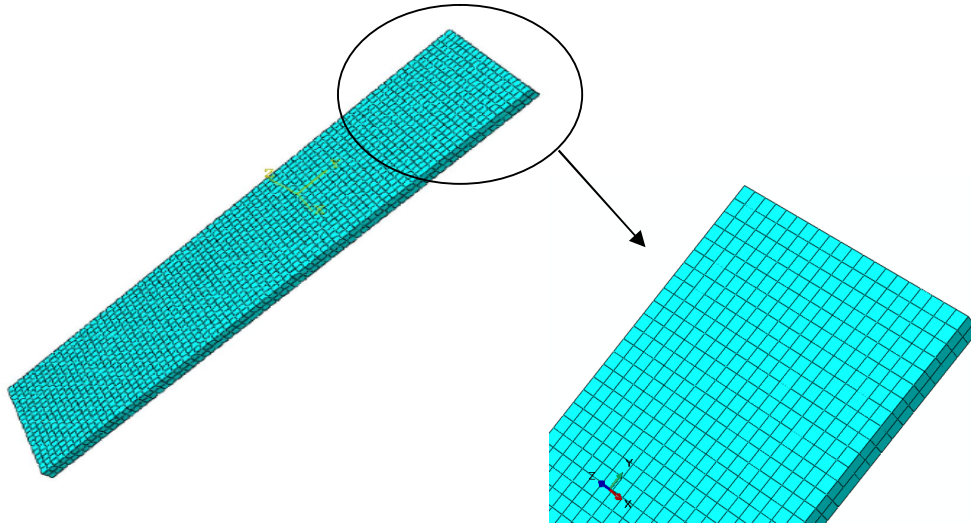


**Figure IV.13:** Les dimensions d'éprouvette simulée sur ABAQUS en mm.



### IV.3.1. Le maillage

La figure IV.14 montre le maillage adopté pour la simulation de l'essai de traction. Le type d'éléments est quadratique à huit nœuds de type C3D8R (briques à 8 nœuds).



**Figure IV.14:** Le maillage utilisé pour l'éprouvette (0.5mm).

### IV.3.2 paramètre de la simulation

#### IV.3.2.1 Elasticité : loi de Hook

La loi d'élasticité est donnée par

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \times \boldsymbol{\varepsilon}$$

En raison des valeurs proches du module de Young, nous avons donc supposé le matériau isotrope

- Le module de Young  $E = 218800 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$

#### IV.3.2.2 Critère de HILL : orthotropie

La contrainte de Hill est une extension de la contrainte de Von-Mises afin de décrire le comportement anisotrope du matériau. Elle est donnée par :

$$\sigma_{eq}^H = \sqrt{F(\sigma_y + \sigma_z)^2 + G(\sigma_z + \sigma_x)^2 + H(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 2L\tau_{zx}^2 + 2M\tau_{yz}^2 + 2N\tau_{xy}^2} \quad (IV.1)$$

F, G, H, N, L et M sont des constantes obtenues à partir des essais de traction suivant plusieurs directions.

Cette contrainte sera utilisée dans le critère de plasticité :  $\sigma_{eq}^H - R_e \leq 0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l}
 F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)} \\
 H = \frac{r_0}{1+r_0} \\
 G = \frac{1}{1+r_0} \\
 N = \frac{2(F+G)r_{45}+F+G}{2} \\
 L = \frac{3}{2R_{23}^2} \\
 M = \frac{3}{2R_{13}^2}
 \end{array} \right. \quad (IV.2)$$

F	H	G	N	L	M
0.28	0.63	0.37	1.48	1.5	1.5

Tableau IV. 1 : Coefficients de Hill.

En revanche, ABQUS utilise les coefficients  $R_{ij}$  qui sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 R_{11}^2 = F+H \\
 R_{33}^2 = F+G \\
 R_{12}^2 = 3/2N \\
 R_{13}^2 = 3/2M \\
 R_{23}^2 = 3/2L
 \end{array} \right. \quad (IV.3)$$

Après calcul, nous obtenons les valeurs

$R_{11}$	$R_{22}$	$R_{33}$	$R_{12}$	$R_{23}$	$R_{33}$
1	0.74	0.80	1	1	1.006

Tableau IV. 2 : Coefficient  $R_{ij}$ 

### IV.3.3. Conditions aux limites

La figure IV.15 présente les conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction. Une extrémité de l'éprouvette est encastree, par contre un déplacement est imposé sur l'autre extrémités. les conditions de symétries sont imposées sur l'éprouvette pour reproduire le chargement sur tout l'éprouvettes.

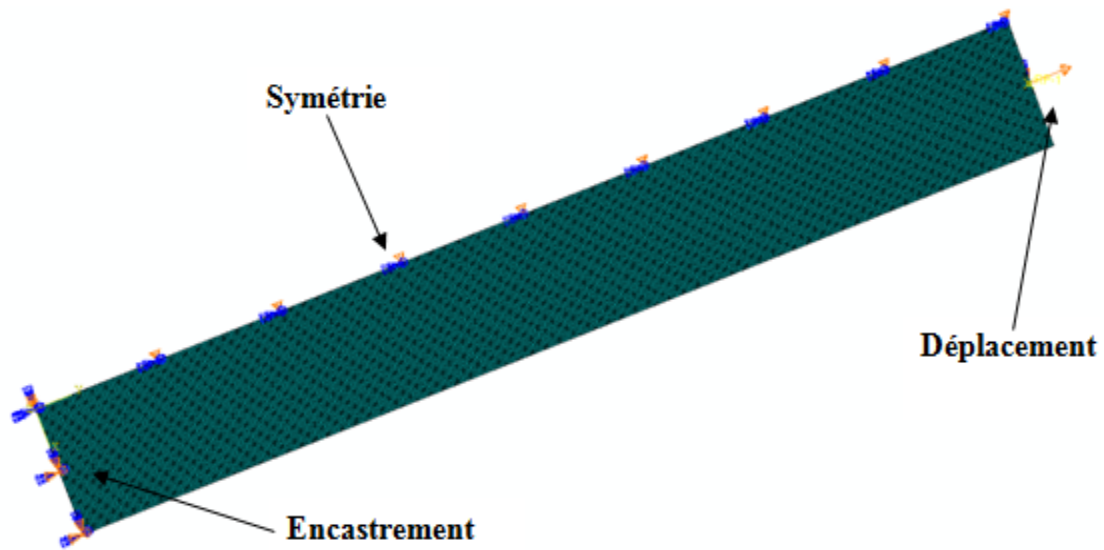


Figure IV. 15 : Répartition des conditions limite.

#### IV.3.4. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

Les comparaisons des courbes de traction obtenues par simulation numérique et expérimentalement selon différentes directions, sont représentées sur les figures (IV.16, IV.17 et IV.18)

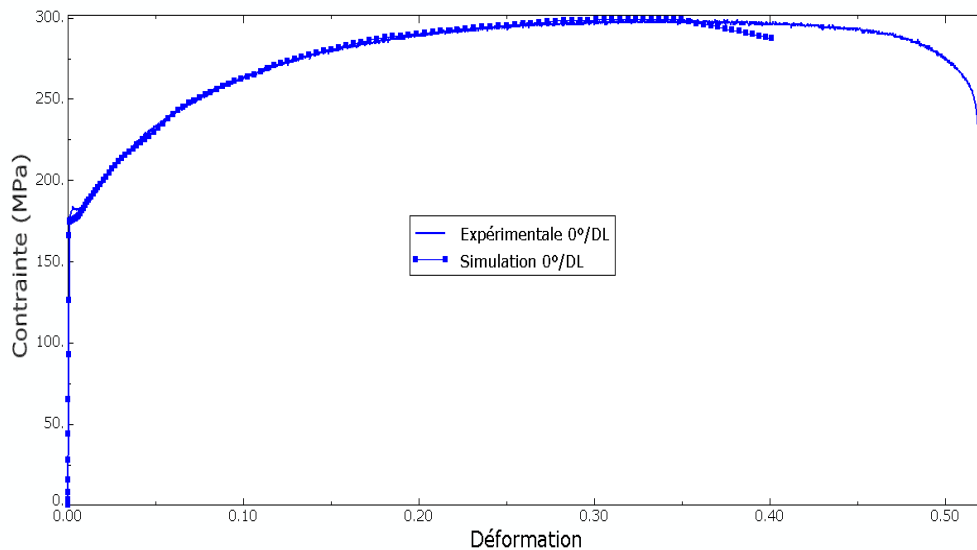
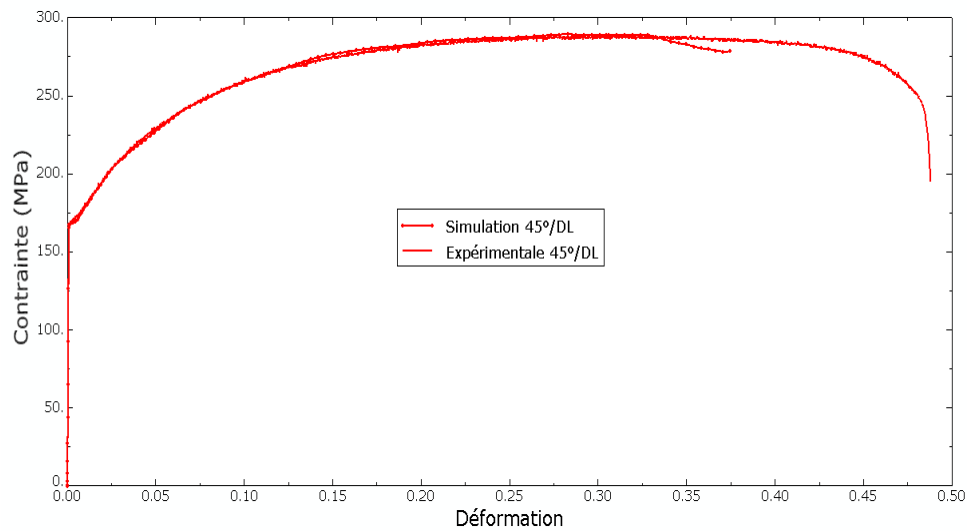
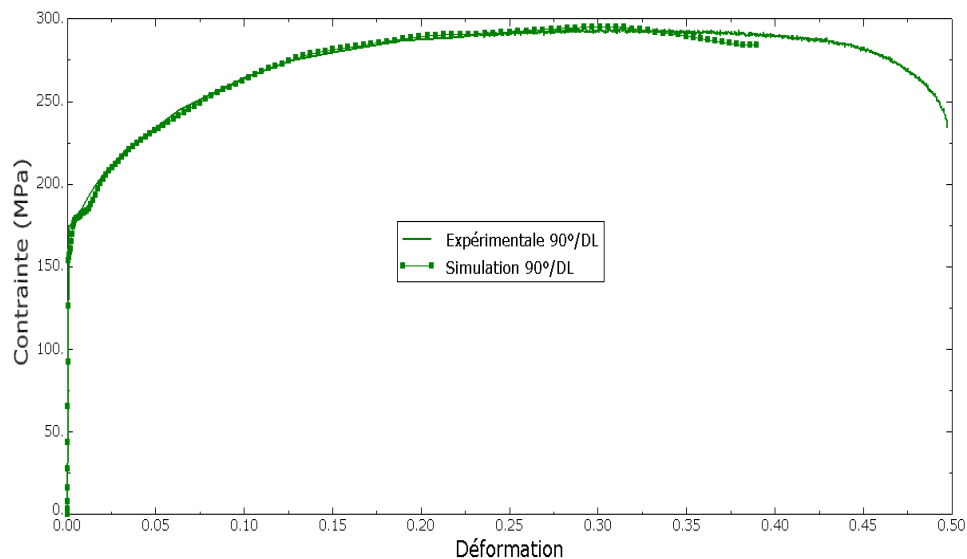


Figure IV. 16 : comparaison des courbes de Contrainte-Déformation expérimentale et numérique Selon la direction de laminage (0°/DL)

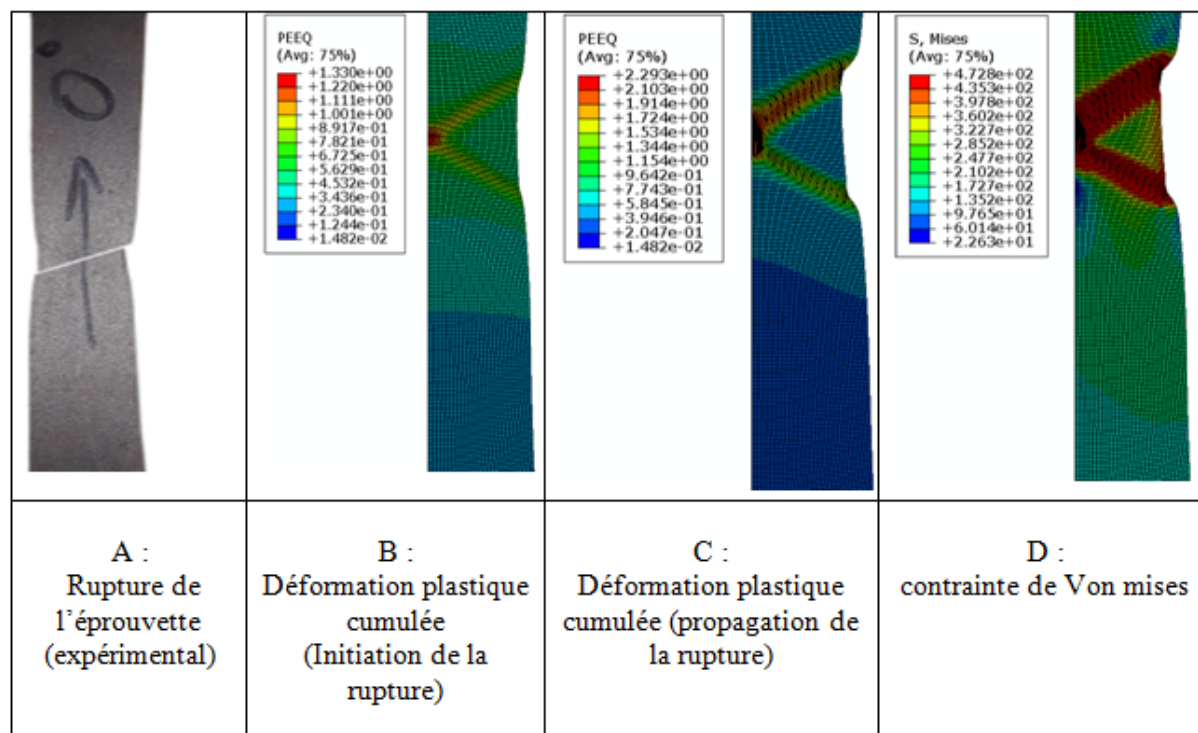


**Figure IV. 17 :** Comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et Numérique Selon la direction 45° /DL

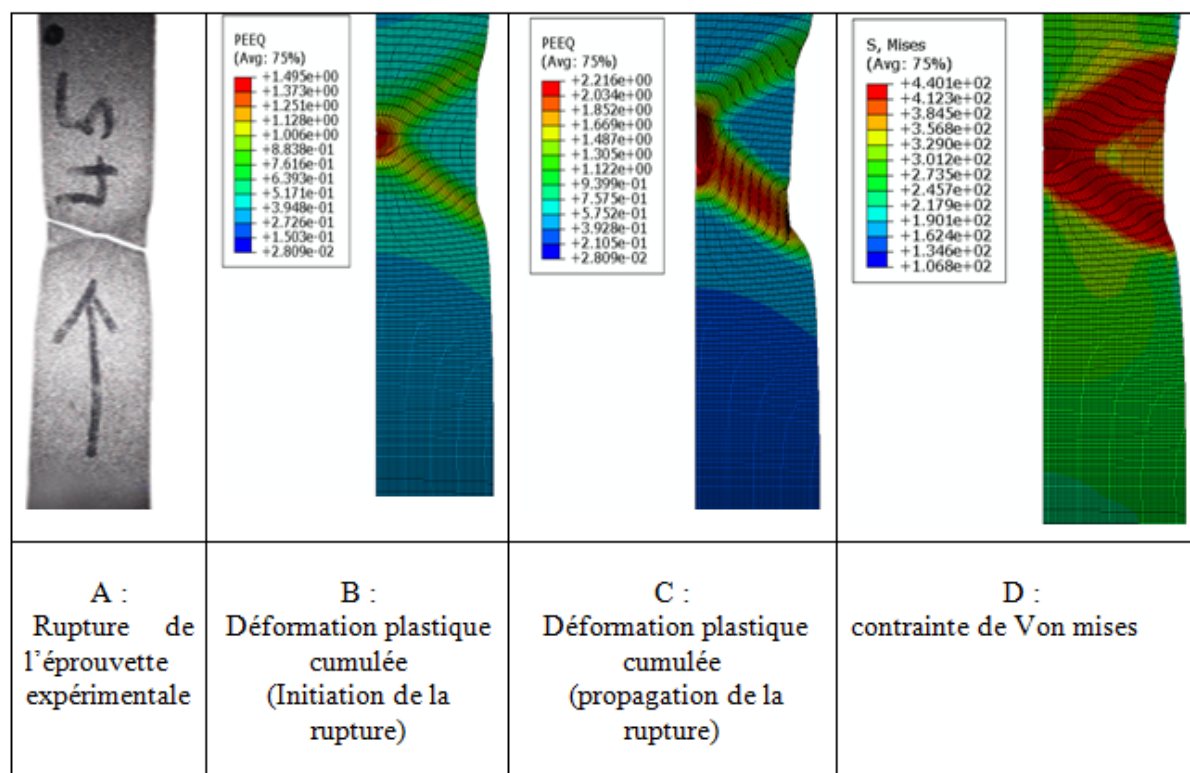


**Figure IV. 18 :** comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et numérique selon la direction 90°/DL

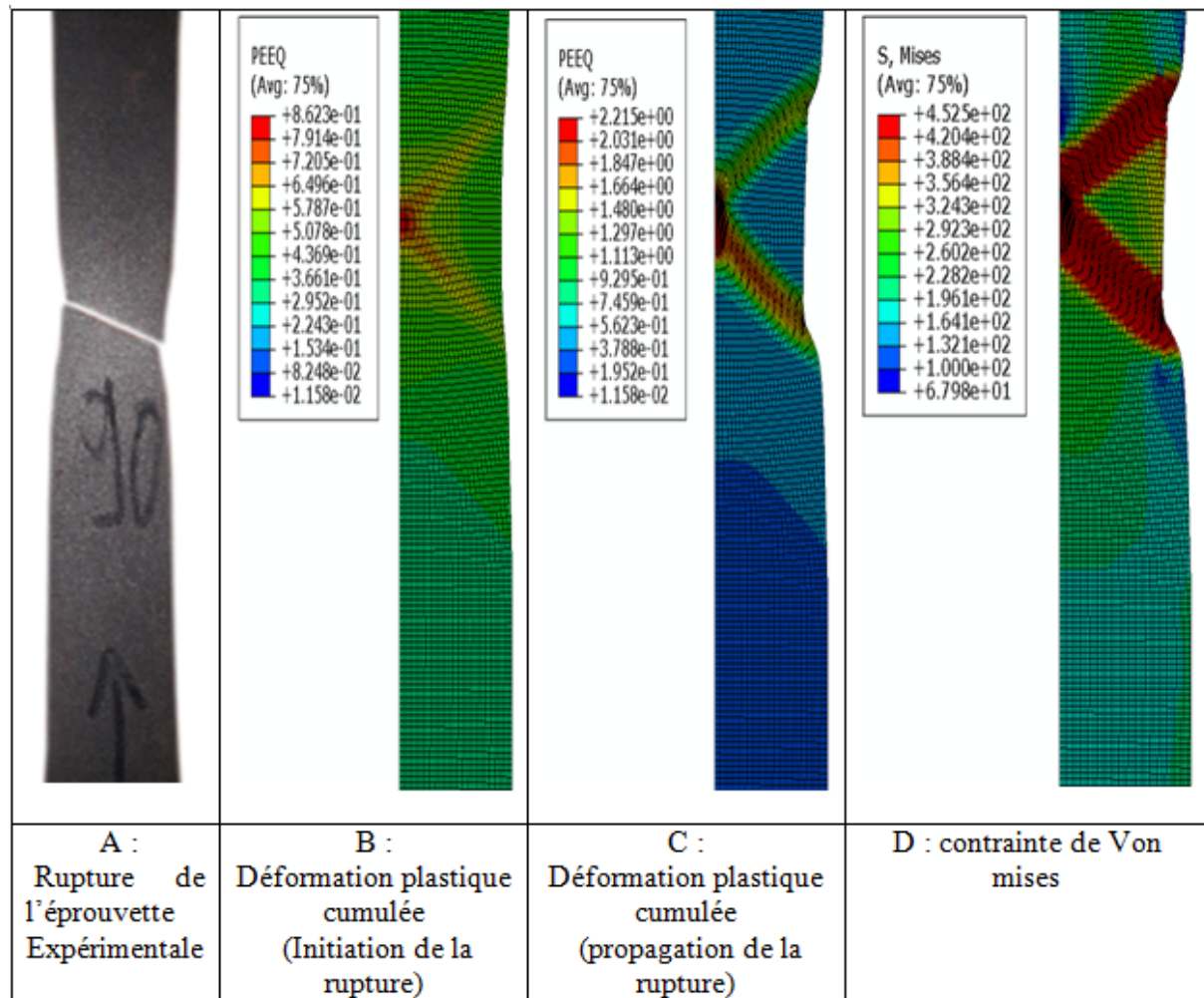
Les figures (IV.19, IV.20 et IV.21) montrent les contours de déplacement, déformation et contrainte de Von mises des éprouvettes selon les trois directions de laminage après simulation.



**Figure IV. 19:** Les contours des déplacements, déformations et contraintes selon la direction de laminage



**Figure IV. 20 :** La rupture d'éprouvette selon la direction 45°/DL

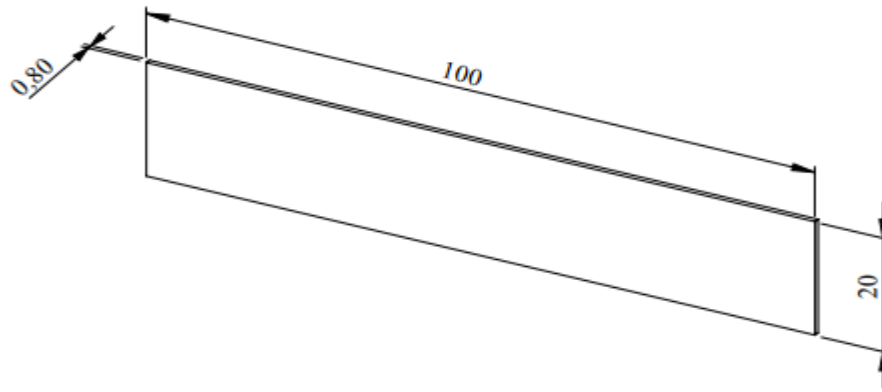


**Figure IV. 21 :** La rupture d'éprouvette selon la direction 90°/DL

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numérique montre que L'approche de modélisation adoptée permet de reproduit correctement le comportement mécanique des éprouvettes sollicitées en traction.

#### IV.4. Simulation de l'essai de flexion

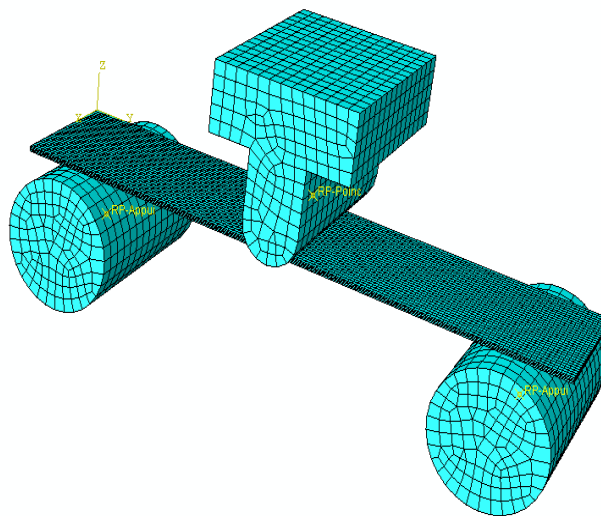
La figure (IV.22) montre les dimensions de l'éprouvette (en mm) utilisée dans la simulation de l'essai de flexion dans ce cas nous avons modélisé toute l'éprouvette



**Figure IV. 22 :** Les dimensions d'éprouvette simulée sur ABAQUS.

#### IV.4.1. Le maillage

La figure IV.23 présente le maillage adopté pour la simulation de l'essai de flexion. Le type éléments est quadratique à huit nœuds de type C3D8R (briques à 8 nœuds) les appuis et le poinçon sont supposée rigide indéformables. Leurs positions sont montrées sur la même figure.



**Figure IV. 23 :** Le maillage.

#### IV.4.2. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées dans notre cas sont : l'éprouvette est posée sur deux appuis fixes (en castrés). À l'aide d'un poinçon nous appliquons un déplacement de 22 mm au poinçon.

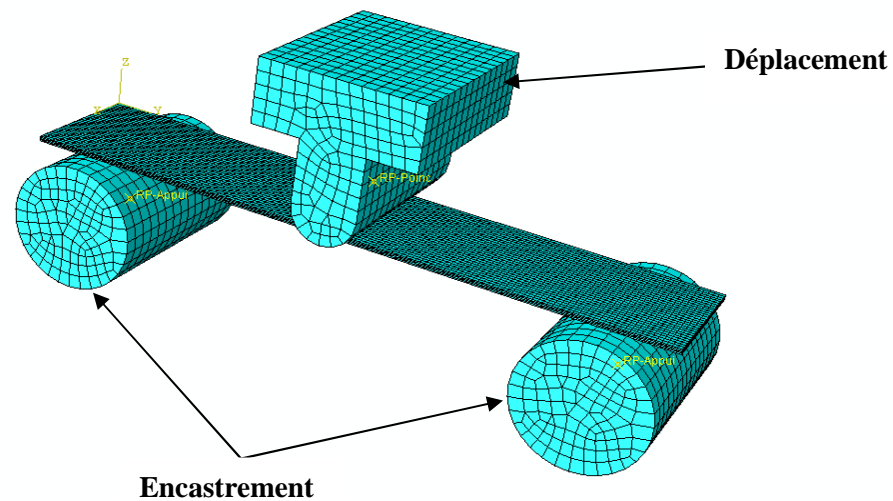


Figure IV. 24 : Répartition des conditions limite.

#### IV.4.3. Modèle simulation

##### IV.4.3.1. Elasticité : loi de Hook

Les paramètres du modèle élasticité sont :

- Module de Young  $E = 218800 \text{ MPa}$
- Coefficient de poisson  $\nu = 0.3$

##### IV.4.3.2. Critère de Hill : orthotropie

Pour le modèle de Hill, les paramètres recherche sont donnés par le tableau suivant :

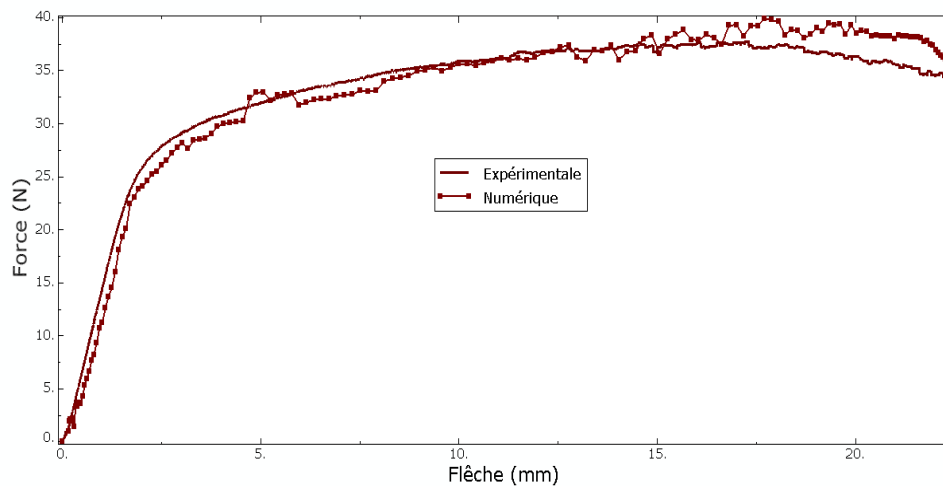
$R_{11}$	$R_{22}$	$R_{33}$	$R_{12}$	$R_{23}$	$R_{33}$
1	0.74	0.80	1	1	1.006

Tableau IV. 3 : Coefficient  $R_{ij}$

#### IV.4.4. Comparaison des courbes de flexion expérimentale et numérique

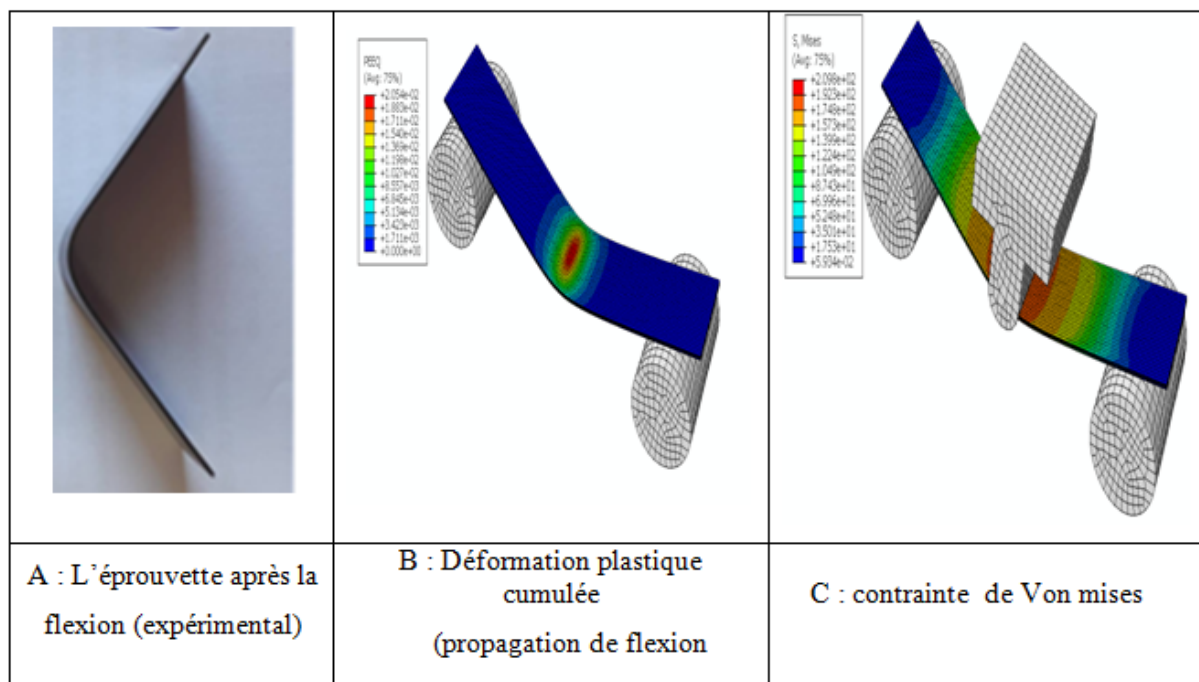
La superposition des courbes force de flexion- flèche obtenues par simulation numérique est expérimentalement, est représentée la figure (IV.25)





**Figure IV. 25 :** Comparaison de la courbe expérimentale et numérique de la force – déplacements.

Cette figure montre une bonne correspondance entre les résultats numérique et expérimental



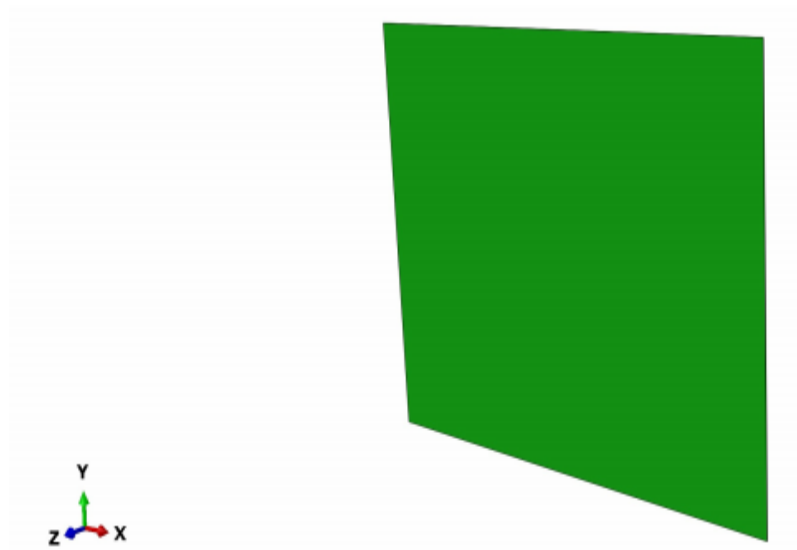
**Figure IV. 26 :** Simulation de l'essai de flexion

#### IV.5. Application : Simulation de l'emboutissage d'une tôle mince

Après identification des coefficients de matériau DC04 en traction et vérification en flexion nous considérons l'opération d'emboutissage, nous réalisons donc une simulation numérique en 3D, avec le code du calcul par élément finis ABAQUS.

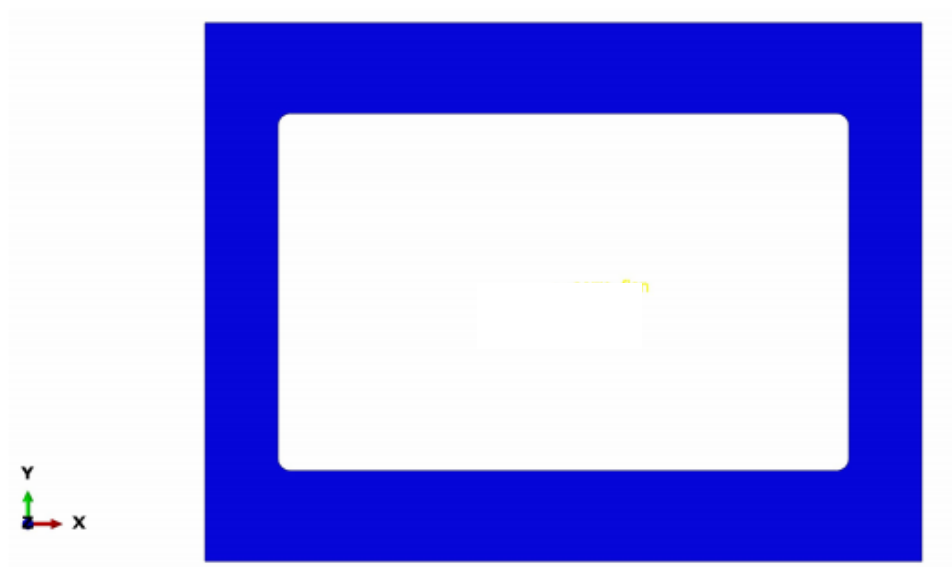
Le principe de cette opération consiste à déformer une tôle maintenue fixe entre la matrice et le serre-flan, sous l'action d'un poinçon. Les dimensions et la géométrie de ces article sont

fournis par l'ENIEM .Le but de cette étude est de décrire le voilage des tôles embouties dans le but d'y remédier ultérieurement.

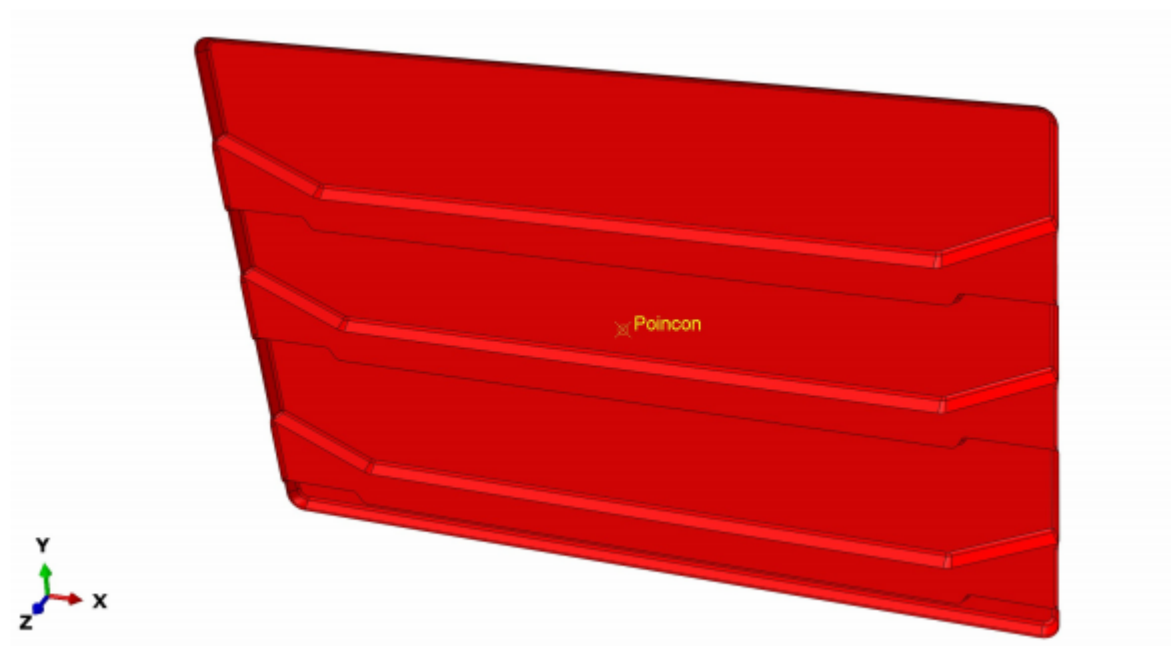


**Figure IV. 27 : Flan**

Les géométries des outils sont données sur les figures (28-30). L'assemblage nécessaire pour simuler l'opération de l'emboutissage est donné sur la figure IV.31.

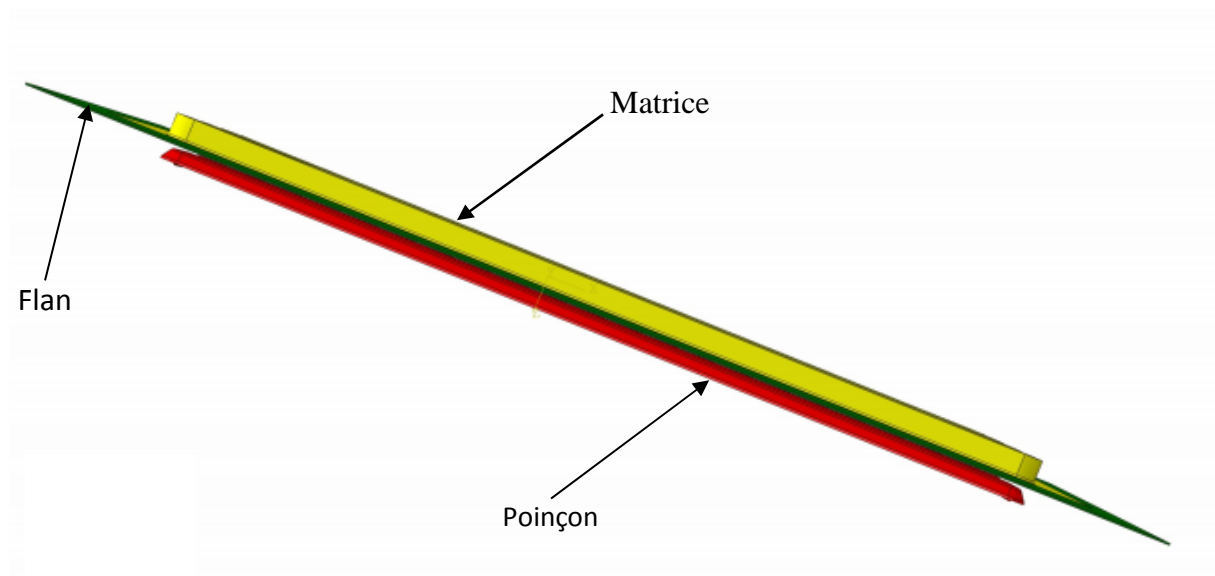


**Figure IV. 28: Serre flan**

**Figure IV. 29 : Matrice****Figure IV. 30: Poinçon**

Les outils (matrice ; poinçon ; serre flan) sont supposé rigides indéformables. Nous avons utilisé les mêmes coefficients des modèles que le précédent.

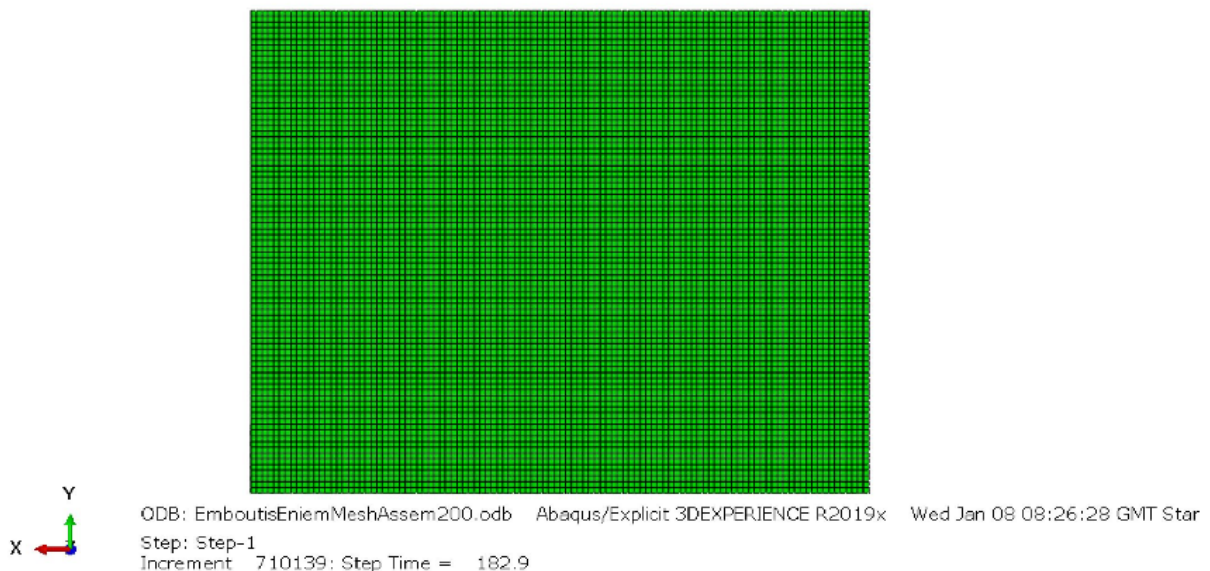
La figure IV.31. Positionnement des éléments du procédé d'emboutissage.



**Figure IV. 31 :** Positionnement des éléments du procédé d'emboutissage.

#### IV.5.1. Le maillage

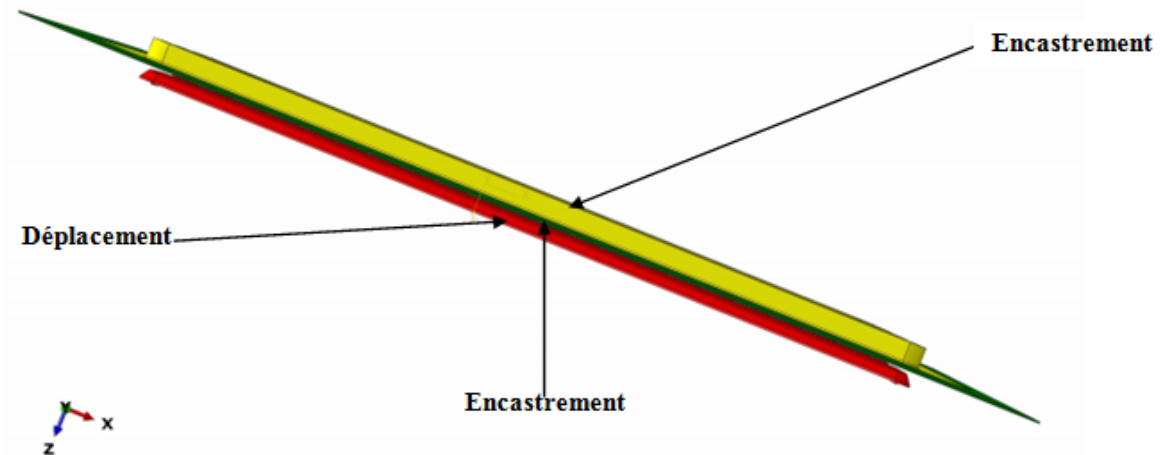
Il est bien connu que la solution éléments-finis dépend du maillage. En effet ce dernier doit être suffisamment fin afin de capter correctement la solution. Le nombre d'éléments doit d'autre part être limité en raison du temps de calcul qui croit fortement avec le nombre des éléments. Après étude de la convergence du maillage, nous avons choisi Le maillage du flan de type quadratique à huit nœuds (C3D8R), représenté sur la figure IV.32.



**Figure IV. 32 :** Le maillage de la tôle.

### IV.5.2. Les conditions aux limites

La simulation a été réalisée avec des conditions aux limites suivantes : la matrice et le serre flan sont fixés (les déplacements sur toutes les directions doivent être nuls), et on applique au poinçon un déplacement de 6mm.

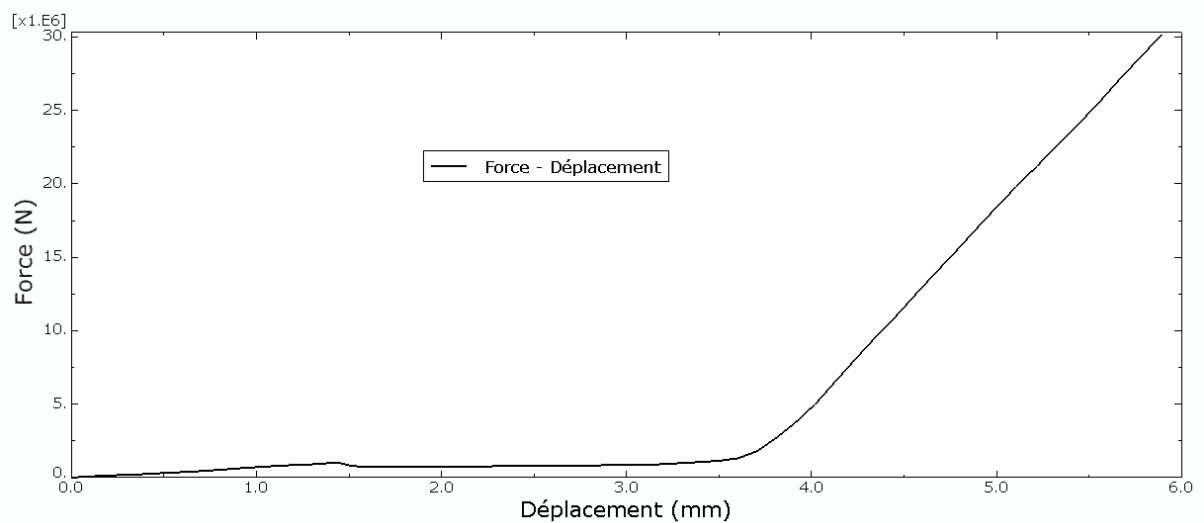


**Figure IV. 33 :** Représentation des conditions aux limites.

Cette façon de procéder nous permettra donc un premier temps de déterminer la force maximale.

### IV.5.3. détermination de l'effort max.

La figure I.V.34 montre que la force maximale est  $F_{\max} = 30000\text{KN}$

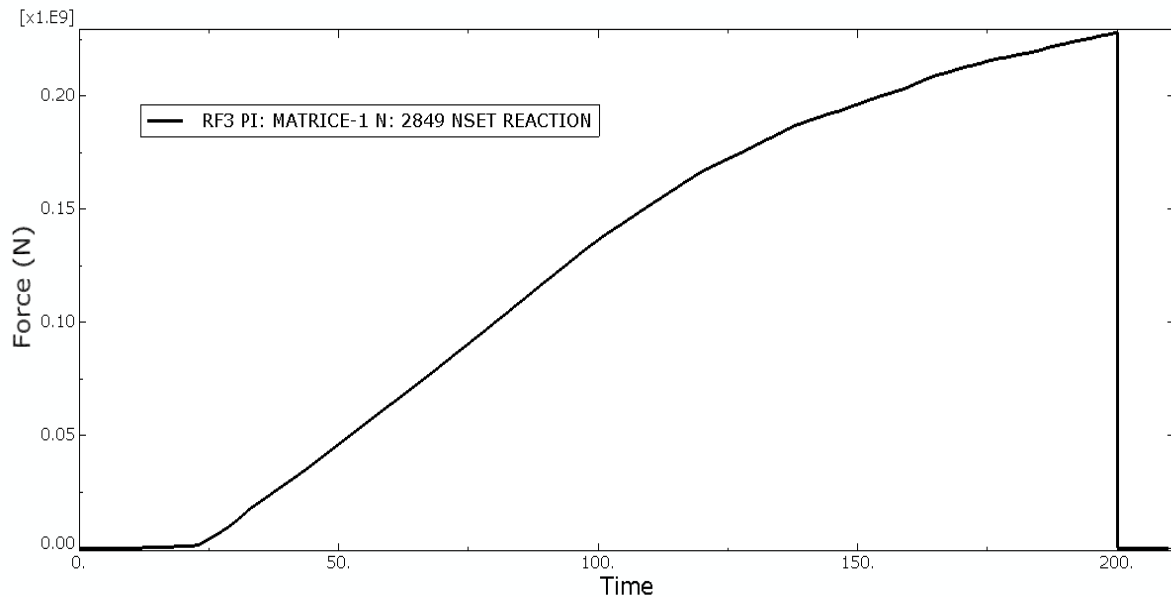


**Figure IV. 34:** Evolution de l'effort su le poinçon en fonction de la course

#### IV.5.4. Simulation de voilage

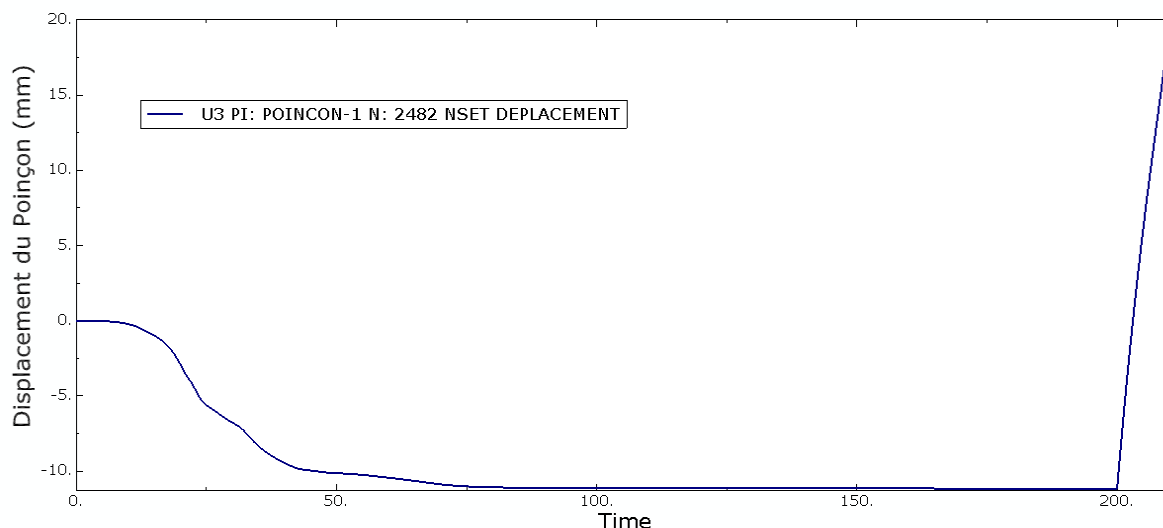
Une fois la force nécessaire pour réaliser l'emboutissage déterminée, nous l'appliquons sur le poinçon pour réaliser l'emboutissage. Une fois l'embout fermé, nous retirons cette force afin de modéliser le voilage dû à la relaxation des contraintes.

La figure IV.35. Montre l'application de la force au cours de temps. Comme nous le constatons une fois que la force maximale atteint, nous la retirons.



**Figure IV. 35 :** L'évolution de la force en fonction de temps

La figure (36) illustre le déplacement du poinçon en fonction du temps, la courbe est fractionnée en trois parties distinctes. Dans le premier temps, le déplacement du poinçon est croissant mais non linéaire, la tôle se déforme plastiquement. Dans le deuxième temps, le déplacement du poinçon est faible, résultat du contact de la tôle avec la matrice qui correspond à la fin du formage. Le troisième temps correspond à la remontée de poinçon dû à la relaxation des contraintes dans la tôle.

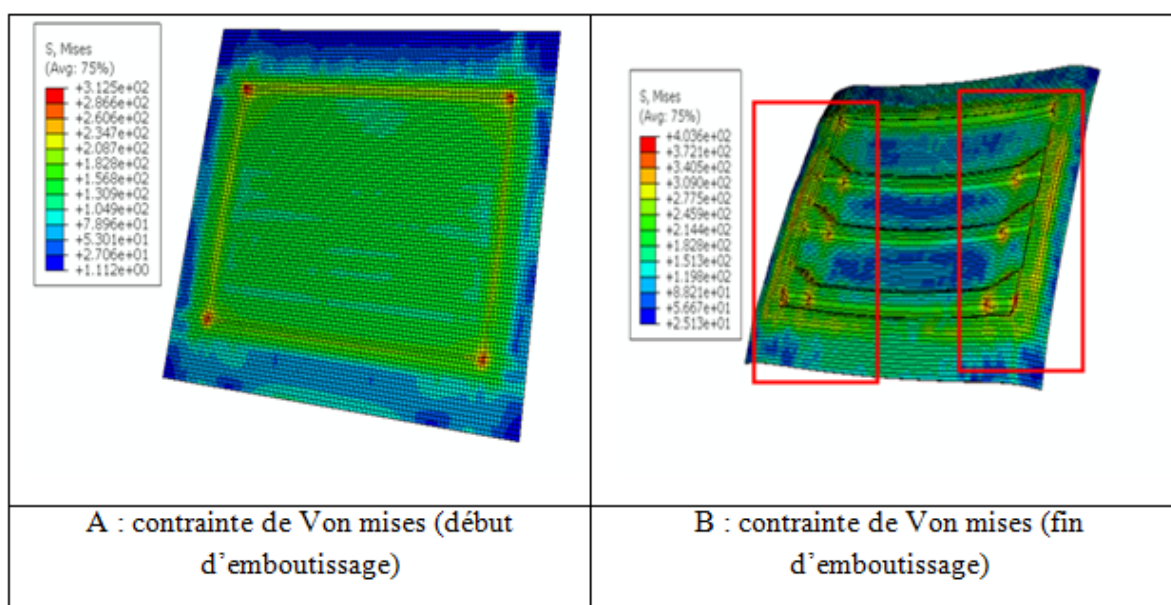


**Figure IV. 36 :** Courbe de déplacement de poinçon en fonction de temps

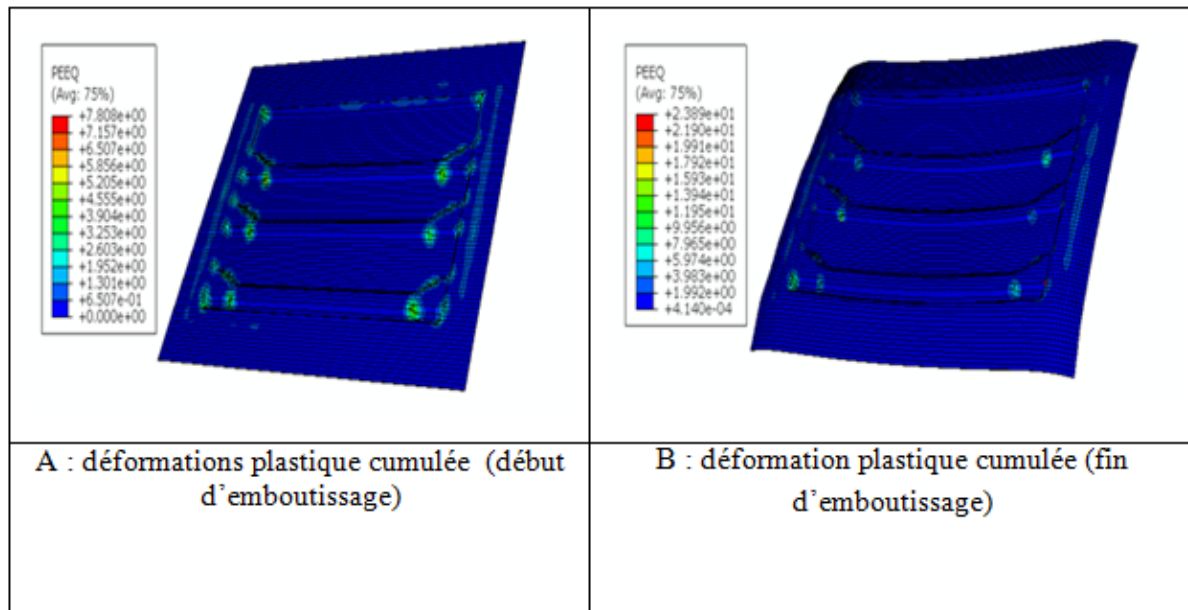
Les figures (37 et 38) illustrent la distribution des contraintes sur la pièce obtenue ainsi que la répartition de la déformation plastique cumulée au cours de l'emboutissage. Nous remarquons une nette concentration des contraintes aux endroits où la géométrie du modèle est plus complexe. Sur ses figures apparaît aussi le voilage, une fois la force retirée.

La figure (39) montre l'image réelle d'une pièce auto nettoyante de cuisinière voilée.

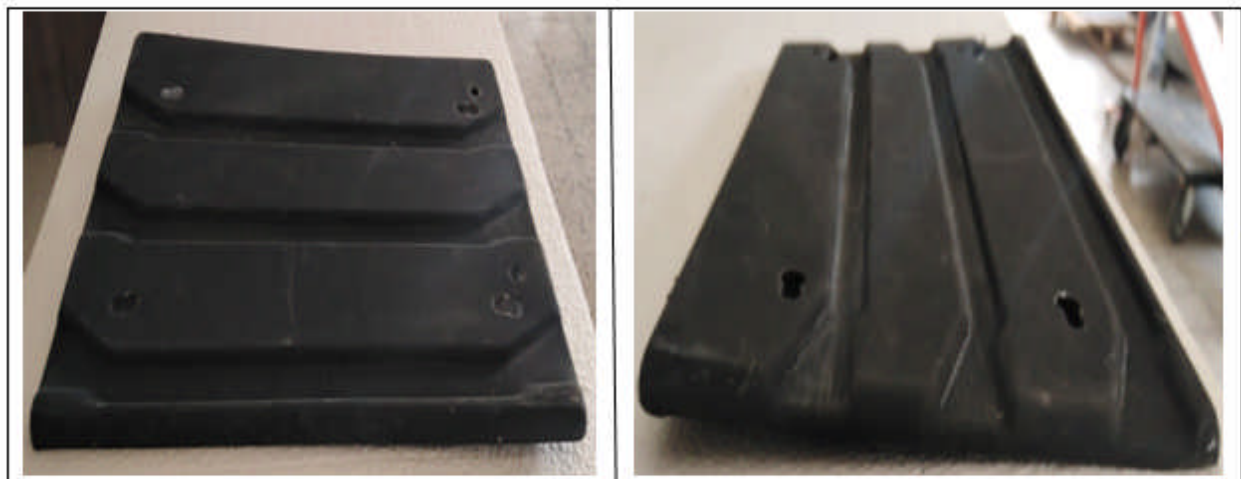
En effet, les bords subissent une relaxation des contraintes et se voilent après le retrait de poinçon



**Figure IV. 37 :** La distribution des contraintes sur la pièce obtenue.



**Figure IV. 38 :** La répartition des déplacements au cours de l'emboutissage.



**Figure IV. 39 :** Montre l'image réelle d'une pièce auto nettoyante de cuisinière voilée.

#### IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une analyse numérique avec le logiciel ABAQUS pour les tests de traction et de flexion qui nous donnent des résultats qui sont proches des résultats expérimentaux.

Une simulation d'emboutissage a été réalisée afin de déterminer les zones voilées.



Figure IV. 1 : Structure d'une analyse sous Abaqus [18].	48
Figure IV. 2 : Organisation d'Abaqus [19]	49
Figure IV.3: Réalisation de la mise en données d'un problème.....	49
Figure IV.4: Module Part .....	50
Figure IV.5: propriété Matériaux et section .....	50
Figure IV.6: Instance et assemblage .....	51
Figure IV.7: Création de step .....	51
Figure IV.8: interaction .....	52
Figure IV.9: Création des chargements.....	52
Figure IV.10: Création de maillage.....	53
Figure IV.11: Lancement de calcul .....	53
Figure IV.12: Affichage des résultats [21].....	53
Figure IV.13: Les démentions d'éprouvette simulée sur ABAQUS en mm.....	54
Figure IV.14: Le maillage utilisé pour l'éprouvette (0.5mm).....	55
Figure IV. 15 : Répartition des conditions limite.....	57
Figure IV. 16 : comparaison des courbes de Contrainte-.....	57
Figure IV. 17 : Comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et .....	58
Figure IV. 18 : comparaison de la courbe de Contrainte-Déformation expérimentale et numérique selon la direction 90°/DL .....	58
Figure IV. 19: Les contours des déplacements, déformations et contraintes selon la direction de laminage .....	59
Figure IV. 20 : La rupture d'éprouvette selon la direction 45°/DL.....	59
Figure IV. 21 : La rupture d'éprouvette selon la direction 90°/DL.....	60
Figure IV. 22 : Les démentions d'éprouvette simulée sur ABAQUS.....	61
Figure IV. 23 : Le maillage. ....	61
Figure IV. 24 : Répartition des conditions limite.....	62

Figure IV. 25 : Comparaison de la courbe expérimental et numérique de la force – déplacements. ....	63
Figure IV. 26 : Simulation de l’essai de flexion .....	63
Figure IV. 27 : Flan .....	64
Figure IV. 28: Serre flan .....	64
Figure IV. 29 : Matrice.....	65
Figure IV. 30: Poinçon .....	65
Figure IV. 31 : Positionnement des éléments du procédé d’emboutissage.....	66
Figure IV. 32 : Le maillage de la tôle. ....	66
Figure IV. 33 : Représentation des conditions aux limites.....	67
Figure IV. 34: Evolution de l’effort su le poinçon en fonction de la course.....	67
Figure IV. 35 : L’évolution de la force en fonction de temps .....	68
Figure IV. 36 : Courbe de déplacement de poinçon en fonction de tramps .....	69
Figure IV. 37 : La distribution des contraintes sur la pièce obtenue.....	69
Figure IV. 38 : La répartition des déplacements au cours de l’emboutissage.....	70
Figure IV. 39 : Montre l’image réelle d une pièce auto nettoyante de cuisinière voilée. ....	70

## Sommaire

IV.1. Introduction .....	47
IV.2. Généralité sur le code de calcul ABAQUS .....	47
IV.2.1. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus .....	48
IV.2.1.1. Fichier d'entrée (Input file) : Extension.inp .....	48
IV.2.1.2. Fichier de résultats (output file) : Extension.odb.....	48
IV.2.2. Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation .....	48
IV.2.3. Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement) .....	48
IV.2.4. Les modules.....	49
IV.3. Simulation de l'essai de traction .....	54
IV.3.1. Le maillage .....	55
IV.3.2 paramètre de la simulation .....	55
IV.3.2.1 Elasticité : loi de Hook .....	55
IV.3.2.2 Critère de HILL : orthotropie.....	55
IV.3.3. Conditions aux limites.....	56
IV.3.4. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.....	57
IV.4. Simulation de l'essai de flexion .....	60
IV.4.1. Le maillage .....	61
IV.4.2. Les conditions aux limites.....	61
IV.4.3. Modèle simulation .....	62
IV.4.3.1. Elasticité : loi de Hook .....	62
IV.4.3.2. Critère de Hill : orthotropie .....	62
IV.4.4. Comparaison des courbes de flexion expérimentale et numérique .....	62
IV.5. Application : Simulation de l'emboutissage d'une tôle mince .....	63
IV.5.1. Le maillage .....	66
IV.5.2. Les conditions aux limites.....	67
IV.5.3. détermination de l'effort max.....	67

IV.5.4. Simulation de voilage .....	68
IV.6. Conclusion .....	70
Tableau IV. 1 : Coefficients de Hill. ....	56
Tableau IV. 2 : Coefficient $R_{ij}$ .....	56
Tableau IV. 3 : Coefficient $R_{ij}$ .....	62

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire, a permis de mesurer l'importance de la modélisation et de la simulation numérique, en particulier, dans le domaine du formage à froid des tôles minces, tout en veillant à minimiser les dommages et les pertes économiques, pendant l'opération de mise en forme.

Cette étude nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de fabrication par formage à froid des tôles minces et d'apprendre les techniques expérimentales de caractérisation (Traction, Flexion, Emboutissage...etc) des aciers (dureté...etc.) et de se familiariser avec la simulation des procédés de fabrication avec logiciel ABAQUS.

L'objectif principal de ce travail était la mise au point d'une méthodologie numérique de prévision de voilage d'une tôle minces en acier obtenu par grandes déformation plastique. Pour cela, nous avons réalisé une simulation numérique avec ABAQUS, qui décrit et reproduit le comportement mécanique du matériau lors de sa mise en forme.

Cette étude nous a permis de :

- **Essai de traction :**

Déterminer les caractéristiques mécaniques de la tôle d'étude ; module de Yong et limite élastique.etc

Déterminer les coefficients de l'anisotropie (critère de HILL)

Simuler l'essai de traction avec critère de HILL selon les trois directions par rapport en sens de laminage et se familiariser avec le code de calcul Abaqus.

Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

- **Essai de flexion :**

Déterminer les caractéristiques mécaniques de la tôle d'étude en flexion.

Simuler l'essai de flexion avec critère de HILL selon les trois directions par rapport en sens de laminage et se familiariser avec le code de calcul Abaqus.

Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

- **Simulation de l'emboutissage :**

Etudier le phénomène le voilage de la tôle mince avec simulation numérique de procédé de l'emboutissage.

A la lumière des résultats obtenus avec la simulation numérique, nous relevons la bonne corrélation entre des résultats expérimentaux et numérique dans le cas de la traction et de la flexion

La méthodologie et les paramètres étudiés dans ce travail, s'avèreront d'une utilité pertinente pour la fabrication des pièces finie partir de formage à froid des tôles minces. La simulation numérique sera un critère de décision au niveau des entreprises.

Ce travail se veut une initiation à la recherche scientifique dans les domaines de mise en forme, de la modélisation et simulation numérique.

# **Référence bibliographiques**



## Références bibliographiques

---

- [1] : L. GRISARD, "Modélisation bidimensionnelle de la mise en forme de tôles par la méthode des éléments finis", Thèse de Doctorat, Université de Liège, 1992.
- [2] : B. WASSILIEFF, emboutissage, règles principales, Calcul, Edition Dunod, paris 1970.
- [3] : Ecole Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Enseignement et de Recherche de CLUNY "Cours de Mécanique des Milieux Continus"
- [4] : Construction Mécanique appliquée L.P. AULNOYE cours et applications  
*Références*
- [5]: Nagtegaal, J. C., and L. M. Taylor, "Comparison of Implicit and Explicit Finite
- [6] : É. Felder, Procédés de mise forme : Introduction, Techniques de l'ingénieur, M 3000, 2000.
- [7] : Acier de construction non alliés ou faiblement alliés. Tech. L'ingénieur. Matériaux métalliques M308-1.
- [8] : L'emboutissage des aciers dunod.
- [9] : L'aptitude a l'emboutissage des tôles minces. La Prat. Des Ind. Mécanique 50,213-218.  
<https://doi.Org/10.1051/mattech/19650070213>.
- [10] : Le formage des tôles. Rev. Métallurgie 69,251-272.  
<https://doi.Org/10.1051/metal/197269040251>.
- [11] : Vieillissement des aciers. Ed. Techniques ingénieur.
- [12] : SAHLI RABAH, thèse de master «Etude de la Rupture et de la Formabilité des tôles en Acier A60.Propriétés et Microstructure» Université Mouloud Mammeri - TIZI OUZOU promotion 2012

## Références bibliographiques

---

- [13] : JEAN PAUL BAÏLLON, JEAN MARIE DORLOT, « Des Matériaux », 3<sup>em</sup> édition, Polytechnique Montréal 2000
- [14] : Dominique-F, « Essai mécanique et loi de comportement», germe science
- [15] : J-CARBONNIERE, thèse de doctorat «Contribution a l'analyse du retour élastique en emboutissage» L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.2009
- [16] : « Technique Métallographique ». Préparation des surfaces métalliques pour micrographie et macrographie. Dunod Paris 1960.
- [17] : N. Maouchi, N.Benchabanethèse d'Ingénieur «Etude comparative et contrôle de la résistance à la corrosion de deux tôles en acier (A33 et E24) traitées  
Superficiellement du réfrigérateur 300D (ENIEM) »
- [18] : MEFTEH KAMEL. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.
- [19] : MEFTEH KAMEL. Présentation Abaqus. Formation des masters ; université de Biskra.2014
- [20] : ABAQUS. Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit, élève ingénieur ; université de Nantes. 2007.
- [21] : STEPHANE BOUCHARE. Descriptif ABAQUS ; École d'ingénieurs en génie industrie. Bretagne. 2012.