

Université ABBES LAGHROUR Khenchela

جامعة عباس لغرور خنشلة

Faculté de Sciences et Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية



UNIVERSITE ABBES LAGHROUR - KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES ET

TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Genie Mécanique

Option : Genie Des Matériaux

Thème :

**Simulation par ABAQUS de l'anisotropie
plastique sous l'effet de diverses sollicitations
mécaniques**

Présenté par :

M. ALLOUCHE OUSSAMA TADJ EDDINE

M. LEDMI AKRAM

Encadré par :

Pr CHAHAOUI Oualid

Jury de soutenance:

Président : **Brek Samir**

Examineur : **Chahaoui Oualid**

Encadreur : **Saoudi Abdennour**

MCA Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Pr Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

MCA Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Promotion : 2021-2022



Dédicaces



À ceux qui nous ont donné la vie, symbole de beauté et de fierté, de sagesse et de patience, à qui nous devons de l'amour et de la reconnaissance. À ceux qui attendent avec impatience notre succès. Nos chers parents, qui n'ont jamais cessé de nous soutenir et de nous encourager. Recevez toute notre gratitude pour tous les efforts consentis pour notre éducation.

À nos chers frères et chères sœurs.

À nos cher(e)s ami(e). Notre support et notre force sont bien vous.



REMERCIEMENTS



Je tiens à remercier :

En premier lieu, le Bon Dieu, le Tout Puissant, de m'avoir donné autant de courage, de Patience et de volonté pour atteindre ce but.

Mon encadreur, je lui exprime ici mon attachement et ma profonde reconnaissance de m'avoir proposé un sujet de recherche très riche, puis de m'avoir laissé aller jusqu'au bout de mes idées.

Un grand remerciement à mes enseignants.

Je tiens à remercier mes collègues de travail et mes amis de faculté.

A la fin, je remercie mes parents, mes frères et sœurs et toute ma famille pour leur soutien, sans quoi ce travail n'aurait pu voir le jour.



Sommaire:

Dédicaces

Remerciement

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : LAMINAGE

I.1 Introduction	5
I.2 Laminage	5
I.3 Historique	6
I.3 Les procédés de laminage.....	6
I.3.1 Le laminage à chaud.....	6
I.3.2 Laminage des produits plats	6
I.3.3 Laminage des produits longs	8
I.4 Train fil.....	8
I.5 Défauts engendrés lors de la fabrication des produits laminés à chaud.....	10
I.6 Principales interactions « multi physiques » lors de la déformation à chaud.....	10
I.6.1 Le laminage à froid	10
I.7 Les différents types de laminoirs	11

CHAPITRE II: L'IMBOUTISSAGE

II.1 INTRODUCTION.....	15
II.2. TECHNIQUES DE L'EMBOUTISSAGE.....	15
II.2.1. Conception de l'outil d'emboutissage.....	16
II.2.2. Comportement d'une tôle dans un outil d'emboutissage.....	17
II.2.3. Problèmes rencontrés par la tôle.....	18
II.2.4. Différents modes de déformation	18
II.3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES REFERENCES CONSULTEES.....	20
II.3.1. ESSAIS DE LABORATOIRE	20
II.3.1.1. Essai Jovignot ou essai de gonflement hydraulique	20
II.3.1.2. Essai Swift ou de coupelle profonde.....	21
II.3.1.3. Essai Nakazima.....	21
II.3.1.4. Essais de traction	22
II.3.1.5. Essai Marciniak.....	23
II.4. ASPECTS EXPERIMENTAUX DE LA STRICTION DES TOLES	23
II.4.1. Présentation des Courbes Limites de Formage "CLF"	23
II.5. Influence des paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau sur les CLF.....	26
II.5.1. Influence de la sensibilité à la vitesse de déformation.....	26
II.5.2. Effet de la température	26

Sommaire:

II.5.3. Influence du coefficient d'anisotropie	27
II.5.4. Influence de l'exposant d'écroutissage	27
II.6. PROBLEMATIQUE.....	27

CHAPITRE III ! Simulation par ABAQUS

III.1 Introduction sur ABAQUS.....	30
III.2 Parité théorique	31
III.2.1 Déformation élastique.....	31
III.2.2 Déformation plastique	32
III.3 Parité pratique sur ABAQUS	33
III.3.1 Définition d'ABAQUS	33
III.3.2 Description des possibilités d'ABAQUS.....	33
III.3.2.1 Domaines physiques	33
III.3.2.2 Problèmes	33
III.4 les unités	33
III.5 Description de l'interface ABAQUS.....	34
III.6 Expérimentation effectuée sur le logiciel	36
III.6.1 La géométrie de la pièce	36
III.6.2 Les propriétés de la pièce.....	36
III.6.3 Le chargement	37
III.6.4 Maillage	37
III.6.5 L'étape finale.....	38
III.6.5.1 Dans la direction 0°	39
III.6.5.2 Dans la direction 15°	39
III.6.5.3 Dans la direction 30°	40
III.6.5.4 Dans la direction 45°	40
III.6.5.5 Dans la direction 60°	41
III.6.5.6 Dans la direction 75°	42
III.6.5.7 Dans la direction 90°	43
III.6.6 Les courbes combinées	44
III.6.6.1 Dans la direction 0°	44
III.6.6.2 Dans la direction 15°	44
III.6.6.3 Dans la direction 30°	45
III.6.6.4 Dans la direction 45°	45
III.6.6.5 Dans la direction 60°	46
III.6.6.6 Dans la direction 75°	46

Sommaire:

III.6.6.7 Dans la direction 90°	47
--	----

CHAPITRE IV : LOI DE HILL

IV.1 Application des critères de l'anisotropie	48
IV.1.1 Résultats expérimentaux (ETRAG).....	48
IV.1.2 Résultats simulés (Abaqus).....	48
IV.2 Coefficient de Lankford $r(\theta)$	49
IV.3 Formulation des lois de comportement	50
IV.4 Identification des paramètres d'anisotropie associés et non associés.	51
IV.5 Dépouillement des données	52
IV.5.1 Pour le critère quadratique de Hill48 :.....	52
Conclusion.....	57

Liste des figures:

Figure I :

Figure I- 1 Le procédé de laminage asymétrique	5
Figure I- 2: Le principe du laminage est celui du coin tournant.....	7
Figure I- 3: cage universelle et cage refouleuse : laminage des poutrelles	8
Figure I- 4: Criques de laminage, pailles et replis de matière, etc.....	10
Figure I- 5: Différents types de laminoirs à chaud	11
Figure I- 6: Principe d'une cage sexto	12
Figure I- 7: Principe de cylindres décalés	12
Figure I- 8: Schéma de cylindre de travail	13

Figure II :

Figure II- 1: Description de l'outil d'emboutissage	17
Figure II- 2: Forces appliquées	17
FigureII- 3: Diagramme de différents tests de déformation dans le plan des déformations principales de surface de la tôle.....	19
FigureII- 4: Essai Jovignot.....	20
FigureII- 5: Essai Nakazima	22
FigureII- 6: Différentes déformations mesurées lors d'un essai de traction	22
FigureII- 7: Essai Marciniak.....	23
FigureII- 8 : Diagramme schématique de limite de formage avec différents trajets	25

Figure III:

Figure III- 1: Les déformations parités des déformations (élastique et plastique)	31
Figure III- 2: une dislocation	32
FigureIII-3: Mouvement des dislocations dans le matériau	32
FigureIII- 4: dimensions de l'éprouvette dans ABAQUS	36
FigureIII- 5: Le chargement.....	37
FigureIII- 6: La pièce est devisée en plusieurs mailles	38
FigureIII- 7: Résultats des essais de traction (logiciel ABAQUS)	38
Figure III- 8: la courbe de ABAQUS dans la direction 0°.....	39
Figure III- 9: la courbe de ABAQUS dans la direction 15°.....	39
Figure III- 10: la courbe de ABAQUS dans la direction 30°.....	40
Figure III- 11: la courbe de ABAQUS dans la direction 45°.....	40
Figure III- 12: la courbe de ABAQUS dans la direction 60°.....	41
Figure III- 13: la courbe de ABAQUS dans la direction 75°.....	42
Figure III- 14: la courbe de ABAQUS dans la direction 90°.....	42
Figure III- 15: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 0°.....	43
Figure III- 16: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 15°.....	43
Figure III- 17: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 30°.....	44
Figure III- 18: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 45°.....	44
Figure III- 19: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 60°.....	45
Figure III- 20: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 75°	45
Figure III- 21: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 90°.....	46

Figure IV

Figure IV-1 Résultats de modélisation de contrainte d'écoulement $\sigma(\theta)$ et $r(\theta)$ normalisée sous le cadre des 2 plasticités.....	56
---	----

Liste des Tableaux:

Tableau III.1 : Les contraintes d'écoulement suivant chaque 15° de la direction de laminage	33
Tableau III.2 : Les valeurs des contraintes d'écoulements normalisées	37
Tableau III.3: les résultats de ABAQUS dans la direction 0°	39
Tableau III.4: les résultats de ABAQUS dans la direction 15°	39
Tableau III.5: les résultats de ABAQUS dans la direction 30°	40
Tableau III.6: les résultats de ABAQUS dans la direction 45°	40
Tableau III.7: les résultats de ABAQUS dans la direction 60°	41
Tableau III.8: les résultats de ABAQUS dans la direction 75°	42
Tableau III.9: les résultats de ABAQUS dans la direction 90°	42
Tableau IV.1: Les contraintes d'écoulement suivant chaque 15° de la direction de laminage	48
Tableau IV.2: Les valeurs des contraintes d'écoulements normalisées	48
Tableau IV.3: Les différents résultats expérimentaux obtenus pour cette contribution.	49
Tableau IV.4 : Les différents résultats obtenus par le logiciel Abaqus	50
Tableau IV.5 : Propriétés mécaniques de l'acier DC04 dans trois directions.	52
Tableau IV.6: Propriétés mécaniques de l'acier DC04 dans trois directions données par Abaqus...50	
Tableau IV.7: Grandeurs expérimentales normalisée.....	53
Tableau IV.8: Grandeurs simulées normalisée.	53
Tableau IV.9 : Paramètres d'anisotropie identifiés expérimentalement.....	52
Tableau IV.10 : Paramètres d'anisotropie identifiés par voie de simulation.....	53
Tableau IV.11: Les unités de ABAQUS.....	53
Tableau IV.12: les données sur les propriétés de la pièce.....	53



INTRODUCTION



Introduction :

La caractérisation mécanique des matériaux s'effectue généralement par deux voies : **Expérimentale** : cette étape est cruciale dans l'évaluation d'aptitudes physiques et mécaniques des propriétés désirées pour une utilisation ultérieure. Les deux facteurs prépondérants de cette voie sont (argent et temps), une expérimentation en situation réelle peut se révéler extrêmement coûteuse (échantillonnage et essais par machine), prendre un temps considérable à l'expérimentateur, et donner des résultats dont la fiabilité n'est pas garantie. La seconde voie est la **simulation numérique**, moyennant un outil basé sur méthode des éléments finis tel que **ABAQUS** (dans notre cas) qui apporte une réelle valeur ajoutée au modélisateur. Il suffit d'intégrer dans le modèle un grand nombre de données, de façon à le confronter à toutes les situations envisageables. Ce deuxième choix, assure une meilleure optimisation en garantissant un gain du temps et d'argent.

L'objectif de ce travail est d'évaluer le comportement mécanique anisotrope d'un acier ferritique (RRST1403), acier extra doux non allié destiné à la fabrication des réservoirs de tracteurs au niveau de l'entreprise ETRAG de Constantine en utilisant le formalisme de **Hill48** et par la modélisation en 3D d'un essai de traction simple par simulation numérique. L'étude va se faire sur des éprouvettes prélevées dans différentes directions de la tôle, 0° 15° 30° 45° 60° 75° et 90° par rapport à la direction du laminage.

Cette modélisation va nous permettre donc, de calculer le coefficient d'anisotropie *r-value* et de faire ensuite une comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus antérieurement.

Ce travail est réparti en 2 chapitres :

Chapitre I :

Afin de mieux conduire cette contribution, nous avons commencé par une recherche bibliographique, en avançant quelques concepts généraux qui présentent du procédé de laminage, d'emboutissage, le problème d'anisotropie, les critères de plasticité et des informations sur le matériau RRST1403 avec ses différentes caractéristiques.

Chapitre II :

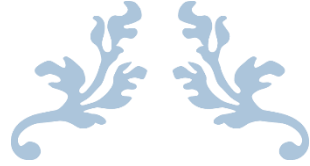
Ce second chapitre est une **simulation** et **modélisation** en 3D d'un essai de traction simple d'un acier ferritique (RRST1403), selon la norme allemande DIN, acier extra doux non allié destiné à la fabrication des réservoirs de tracteurs au niveau de l'entreprise ETRAG de Constantine. A l'aide du logiciel de simulation numérique muni par un code de calcul telle que Abaqus, l'étude de simulation

Introduction

de l'anisotropie mécanique du matériau consiste à prélever virtuellement des éprouvettes plates suivant les septes (7) directions 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° et 90° par rapport à la direction du laminage ($DL= 0^\circ$) dans le plan de la tôle puis simuler les essais expérimentaux réalisés par d'autre binôme dans l'usine des tracteurs de Constantine. L'objectif est d'évaluer l'évolution du comportement anisotrope dans le plan de la tôle destinée à l'emboutissage. Le fichier de sortie, nous a permis de présenter les courbes contrainte-déformation.

L'étude de modélisation va se poursuivre en évaluant les paramètres d'anisotropie surtout le calcul du coefficient de Lankford en se basant sur un critère de plasticité Hill48. Enfin une interprétation et comparaison avec les résultats expérimentaux.

L'étude s'achève par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et des perspectives.



CHAPTER I : LAMINAGE



I.1 Introduction

La déformation plastique est la déformation irréversible d'un objet ; elle se produit lorsque réarrangement des positions relatives des atomes, ou plus généralement des éléments la composition du matériau.

Lorsqu'une pièce est sollicitée (traction, compression, torsion...), la déformation réversible (déformation élastique) commence, c'est-à-dire, il change de taille, mais lorsque la pression s'arrête, il reprend sa forme d'origine.

Certains matériaux sont dits fragiles si la contrainte est trop forte.

Pour les matériaux dits ductiles, une augmentation suffisante de la contrainte se traduit par déformation permanente ; lorsque la charge s'arrête, la pièce se déforme encore. Par exemple le cas de la cuillère à café tordue : on ne pourra jamais la redresser pour en faire reprendre sa forme d'origine.

I.2 Laminage

Le laminage est une opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils tournant autour de leur axe, c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement. C'est la définition du généraliste. [1] [2]

Le procédé de laminage asymétrique permet de réduire l'épaisseur d'une tôle (ou d'un Produit) par passage entre deux cylindres qui n'ont pas les mêmes diamètres (asymétrie géométrique) ou/et ne tournent pas à la même vitesse (asymétrie cinématique) ou/et n'ont pas les mêmes états des surfaces

Ou/et ou de température différente. L'asymétrie peut aussi être engendrée par une asymétrie dans les propriétés de la tôle à l'entrée comme : un gradient de température entre le haut et le bas ou une différence des paramètres rhéologiques de cette dernière.

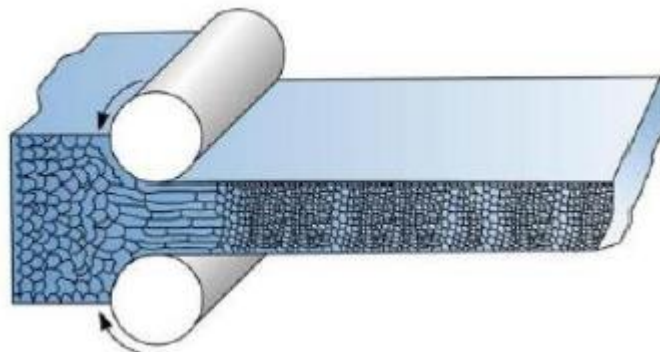


Figure I- 1 Le procédé de laminage asymétrique

I.3 Historique

Le laminage est apparu dans l'usine sidérurgique avec d'autres techniques de mise en forme telles que le forgeage au martinet, au marteau pilon ou à la presse. L'évolution des techniques de forgeage et de laminage ont historiquement suivi des voies complémentaires dans la recherche de la productivité. Les premières forges employaient l'énergie hydraulique et les premiers martinets furent construits à partir du 12^e siècle. [3]

Ils furent peu à peu remplacés par un marteau-pilon entraîné par la vapeur, dont on trouve le premier exemple à simple action en France en 1842. Le premier marteau à double action sera Mémoire fin d'étude Laminage à chaud 19 construit aux États-Unis en 1888. La presse hydraulique est une invention anglaise datant de l'année 1861. [4]

Le premier laminoir fut employé en France en 1553 pour travailler l'or et l'argent. Vers 1750 les premières applications du laminoir à la mise en forme de l'acier sont citées dans plusieurs pays européens. Henry Cort en Angleterre introduira à partir de 1783 les premières augmentations de taille, de puissance et de capacité ouvrant ainsi une période d'évolution rapide des laminoirs. La force motrice nécessaire sera dans un premier temps la vapeur, remplacée au 20^e siècle par l'énergie électrique.

I.3 Les procédés de laminage

Le laminage peut être réalisé à chaud ou à froid. Le premier procédé intervient dans la phase de déformation d'acier à haute température (généralement entre 800 et 1200 °C) tandis que le laminage à froid est généralement réservé aux produits métalliques plats à un niveau de température inférieur à 200 °C.

I.3.1 Le laminage à chaud

Le laminage à chaud a pour but de mettre en forme le matériau. Son principal avantage est le perfectionnement des caractéristiques mécaniques dans le sens de l'étirement. [5]

I.3.2 Laminage des produits plats

Il y a de nombreux types de laminoirs dans l'industrie sidérurgique :

- laminoir à plaque pour des produits de quelques mètres de largeur et de longueur et de plusieurs centimètres d'épaisseur
- laminoir dégrossisseur pour la réduction d'épaisseur des brames sans besoin de précision : transforme un produit issu de l'aciérie (la brame, sorte de pavé d'acier de 10 cm à 20 cm d'épaisseur) en coli (bobine de métal enroulée à chaud) ayant une épaisseur de 2 cm maximum.

- laminoir vertical pour la mise à largeur des produits (fréquemment couplé à un laminoir dégrossisseur)
- train à bande
- Steckel Mill
- train à froid
- réversible à froid



Figure I- 2: Le principe du laminage est celui du coin tournant.

Après passage dans un four de réchauffage qui porte les brames à plus de 1000 °C, le métal acheminé sur des rouleaux motorisés. Progressivement, par un passage successif dans différentes cages équipées de cylindres refroidis à l'eau le métal perd en épaisseur et gagnée longueur.

Une cage de laminoir se compose de :

- un jeu de cylindres de laminage :
 - ✓ une paire de cylindres dits 'de travail' entre lesquels le matériau est allongé.

Les cylindres de travail sont en fonte rectifiée.

- ✓ une autre paire de cylindres dits 'de soutien' (un cylindre de chaque côté de la paire de cylindres de travail) pour diminuer la déformation des cylindres de travail.

Les cylindres de soutien sont en acier.

- deux anneaux métalliques désormais ensemble les cylindres (un anneau de chaque côté).

Les efforts énormes exercés sur les cylindres au cours du laminage provoquent une surépaisseur au milieu de la bande, ce défaut est fréquemment compensé de deux façons :

- ✓ lors de la rectification des cylindres de travail, on donne à ceux-ci un bombé qui compense la surépaisseur.
- ✓ la compensation peut être dynamique grâce à un dispositif de contre-flexion ou cambrage, fréquemment hydraulique.

Qui sert à compenser le défaut presque en temps réel

En sortie de laminoir, la bande peut être soumise à un arrosage d'eau qui lui confère des propriétés proches de celles de la trempe.

Pour éliminer les défauts de planéité de la bande, celle-ci peut passer au travers d'une planeuse, constituée de rouleaux disposés en quinconce d'avant en arrière et de haut en bas serrage de ces rouleaux est dégressif de l'entrée vers la sortie de la machine.

En fin de ligne le métal est enroulé sur des bobineuses.

Un laminoir composé d'une seule cage est fréquemment un laminoir réversible.

Si plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage. De plus si le produit est en prise dans plusieurs cages en même temps, on parlera d'un tandem (c'est le cas pour la production de longues bandes d'acier où les trains ont de 4 à 9 cages).

Les premiers laminoirs continus (sans interruption entre les fours et les bobineuses) apparaissent aux États-Unis dans les années 1930 et après la Seconde Guerre mondiale en France.

I.3.3 Laminage des produits longs

Les blooms ou billettes issues de la coulée en lingots ou de la coulée continue sont transformés en poutrelles, profilés, rails, barres ou fils.

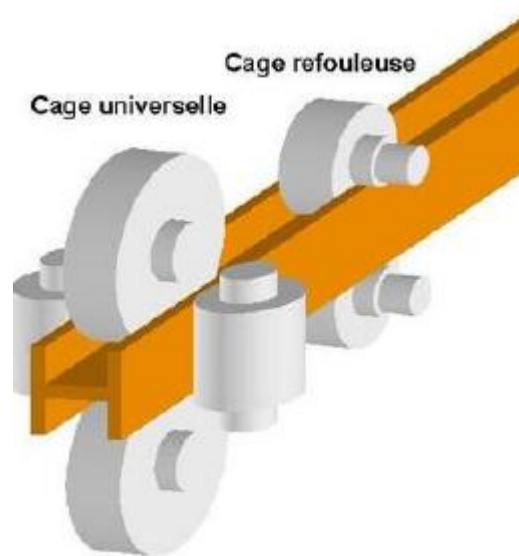


Figure I- 3: cage universelle et cage refouleuse : laminage des poutrelles

I.4 Train fil

Un train fil est un train de laminoirs, continu, spécialisé dans la production de fil machine (produit semi-fini conçu pour la transformation). L'installation mesure 300 à 400 mètres de long.

En tête de l'installation se trouve le parc à billettes (profils de section carrée de 120 à 155mm et de 13 m. de longueur pour un poids autour de 2 tonnes). Ces billettes sont reprises au pont-roulant équipé d'électro-aimants et déposées sur un convoyeur qui les pousse dans un four de réchauffage où elles séjournent à peu près 2 heures (en marche normale) pour être portées à une température de 1100°. Le four est habituellement chauffé au gaz. Une fois la température atteinte de façon homogène,

les billettes sont défournées avec un vérin et engagées à une cadence de 100 à 120 tonnes/heure dans le train de laminoir.

Le train lui-même se compose d'un premier ensemble nommé dégrossisseur composé de 9 cages où le profil carré est progressivement réduit en section. Après cet ensemble, une cisaille éboute le produit pour supprimer les risques de défaut interne. Par la suite le produit engage dans le train intermédiaire qui en réduit toujours la section puis après un nouvel éboutage, dans les trains finisseur qui assurent sur 10 cages la mise au diamètre final du produit.

Au dernier bloc, la vitesse de laminage atteint 80 à 100 mètres/seconde pour les installations les plus rapides. À ce stade le produit fini est à une température de 950° et sort en ligne, il passe alors dans une tête de mise en spire qui lui fait faire une boucle de 1, 20 m. de diamètre. Les spires sont ensuite couchées sur un convoyeur à rouleaux sous lequel est disposée une batterie de ventilateurs qui assure une retombée homogène de la température.

Les spires s'empilent ensuite dans un puits où est constituée la couronne de fil. Celle -ci est ensuite convoyée vers une compacte use-ligature use, marquée et mise en stock.

Une couronne est égale en poids à la billette et est monobrin. Pour avoir un ordre d'idées, une billette de 120x120 mm de 12 m. de long pèse à peu près 1, 5 tonnes et donne une couronne de fil de diamètre 5, 5 mm de même poids pour une longueur déroulée de plus de 10 km.

Ce qui veut dire que la billette est toujours engagée dans la première cage quand le fil sort à la dernière. La fluidité de la marche est assurée par la vitesse de plus en plus rapide de chaque cage puisque chaque cage diminue la section du produit. C'est un ordinateur qui se charge de l'harmonisation des vitesses.

Un train de laminoir fonctionne généralement en trois postes/jour avec par équipe une quinzaine de personnes. Il existe des trains mono-veine, à double ou triple veine. Sur les installations à veines multiples les cages des blocs dégrossisseurs et intermédiaires comportent des cylindres à cannelures multiples puis les veines se séparent et chaque ligne possède ensuite ses propres finisseurs, convoyeur et compacteuse.

Le processus ci-dessus décrit le principe général, chaque train ayant ses caractéristiques propres de vitesse (qui influe sur la cadence de défournement), prise de fer (section de la billette) ou alors nombre de cages par groupe selon sa gamme de fabrication.

I.5 Défauts engendrés lors de la fabrication des produits laminés à chaud

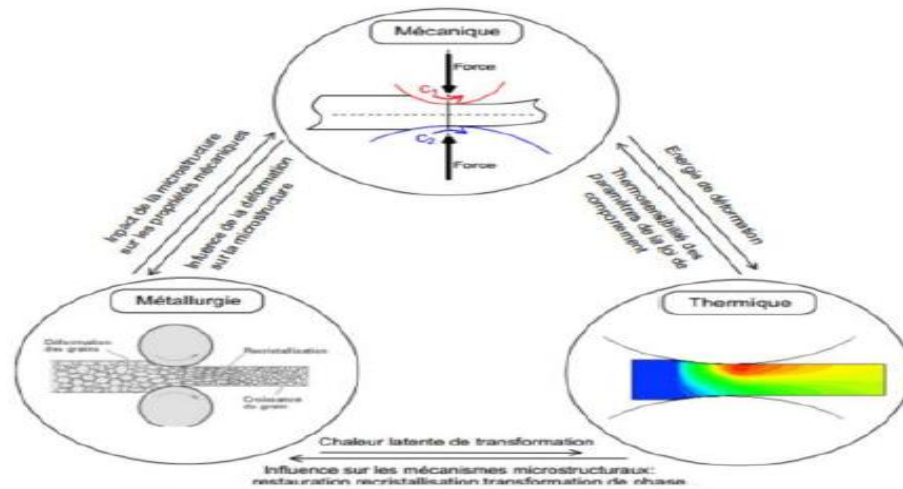


Figure I- 4: Criques de laminage, pailles et replis de matière, etc.

I.6

Principales interactions « multi physiques » lors de la déformation à chaud [5]

I.6.1 Le laminage à froid

C'est lors du laminage à froid que le métal voit ses caractéristiques mécaniques changer, en effet l'écroutissage local (déformation plastique) augmente la zone de déformation élastique.

La limite d'élasticité est repoussée, mais la résistance à la rupture est constante (il s'agit d'une propriété interne du matériau).

Le laminage à froid est le plus souvent réservé aux produits plats (tôles d'acier). Ils transforment produit laminé à chaud en bobine de métal de fine épaisseur (moins de 3 mm). Il existe essentiellement deux types de laminoirs à froid :

- Le laminoir mono cage réversible (le plus simple, la bande passe plusieurs fois dans la même cage de laminoir).
- Le tandem (le plus compliqué, constitué de plusieurs cages (de 4 à 6) au travers desquelles la bande passe simultanément). Le pilotage de ce genre de laminoir est complexe à cause de l'interaction entre les cages.

On notera qu'il existe aussi des laminoirs réversibles à deux cages, mais ce sont des exceptions notables dans le parc mondial des laminoirs.

Il peut être suivi d'opérations de revêtement après recuit et écroutissage.

I.7 Les différents types de laminoirs

- laminoir à produits plats
 - ✓ laminoirs industriels pour les métaux
 - ✓ laminoir à papier
 - ✓ laminoir à verre pour produire les verres imprimés colorés ou non utilisés dans l'aménagement intérieur, les vitrages occultants et la décoration.
- laminoir à produits longs
 - ✓ laminoir à produits longs
 - ✓ laminoirs universels (métaux)
 - ✓ laminoirs en cannelures (métaux)
- laminoirs à fils
 - ✓ fils industriels (cuivre par exemple)
 - ✓ laminoirs de bijoutiers
- laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer
- laminoir à pâtes alimentaires : pour l'ensemble des nouilles plates y compris les lasagnes
- laminoir de boulangerie/pâtisserie : pour les pâtes à tartes, la pâte feuilletée ainsi qu'à croissants

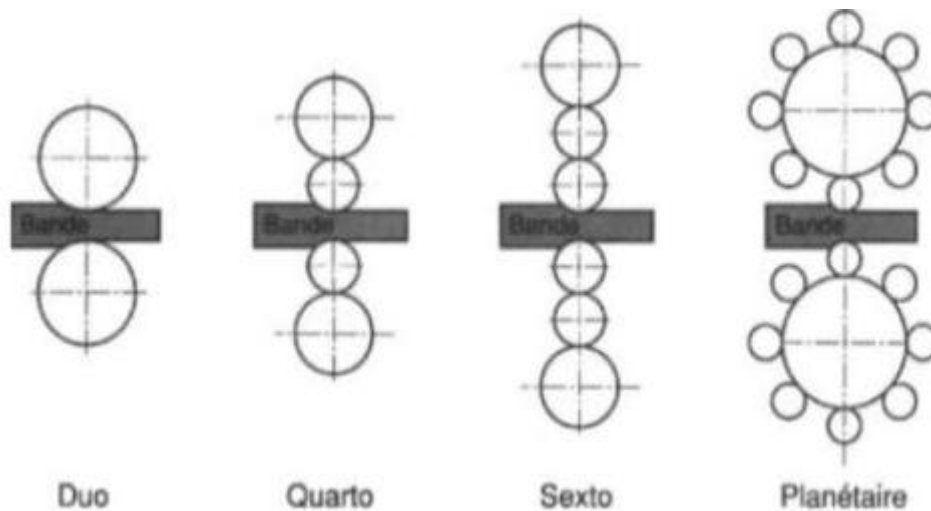


Figure I- 5: Différents types de laminoirs à chaud

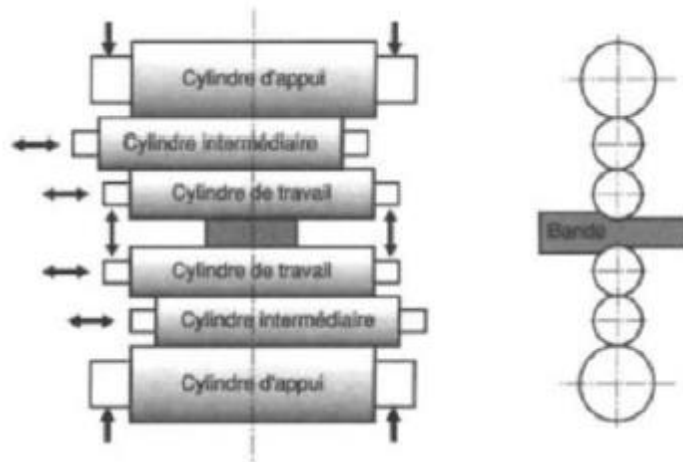


Figure I- 6: Principe d'une cage sexto

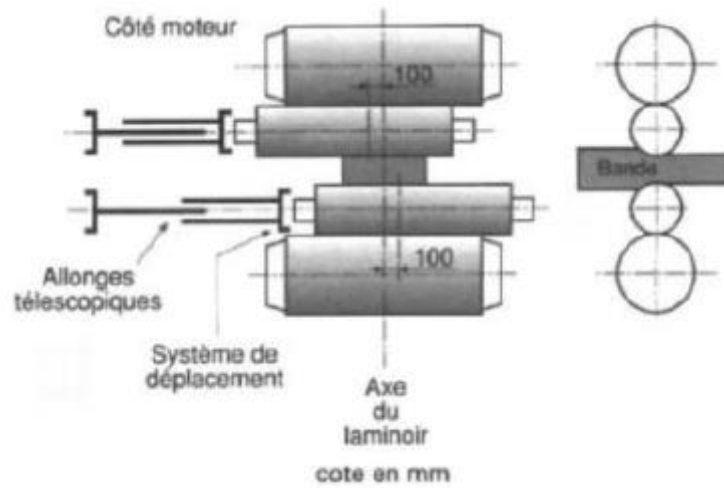


Figure I- 7: Principe de cylindres décalés

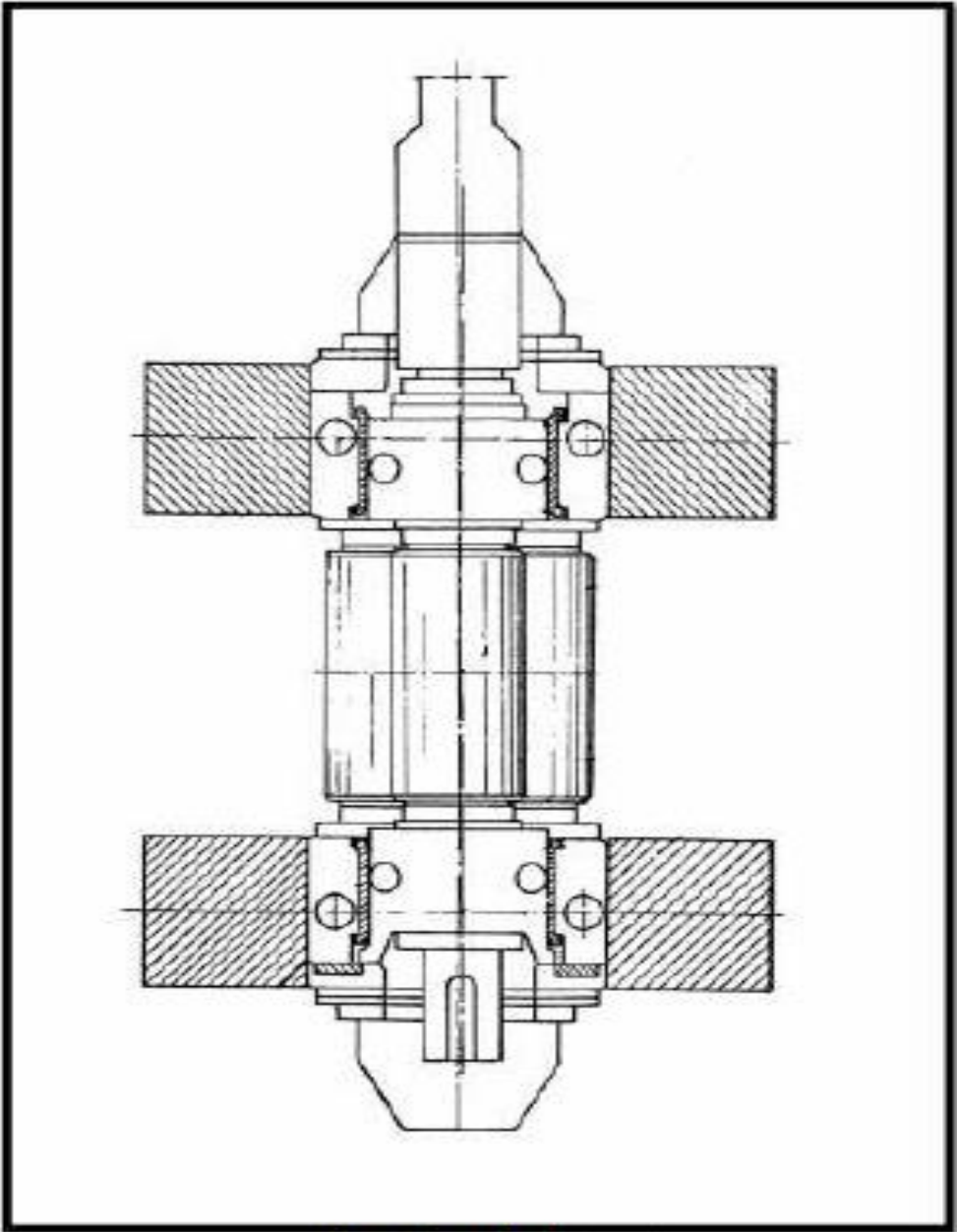


Figure I- 8: Schéma de cylindre de travail



CHAPTER II : **EMBOUITISSAGE**



II.1 INTRODUCTION

Tôles métalliques lors de la mise en forme dépend de façon très significative du comportement plastique du matériau utilisé, tant en ce qui concerne le niveau des efforts d'emboutissage. La répartition des déformations, la formation des cornes La transformation des tôles métalliques en produits finis a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que la construction mécanique, l'automobile ou l'aéronautique. Les procédés de mise en forme des tôles sont multiples : emboutissage, pliage, gonflage, et de nouveaux procédés incluant l'utilisation combinée d'outils solides et de fluide sous pression. Au cours des dernières années, de nombreux efforts se sont portés sur l'étude de ces procédés. L'emboutissage consiste à déformer une tôle sous l'action d'un poinçon, le pourtour de la tôle étant souvent serré mécaniquement par un jonc de retenue permettant de contrôler l'écoulement de la tôle. La mise au point d'une gamme d'emboutissage exige la connaissance des contraintes et déformations induites dans le métal ainsi que les efforts subis par les outillages.

En raison de l'augmentation des limites élastiques des tôles et de la diminution des épaisseurs, les emboutis se situent souvent à la limite définissant le succès de l'opération, par rapport aux risques tels que la **striction** suivie d'une **rupture ductile**, ou le plissement.

Le comportement des dans les processus avec avalement, que les risques d'instabilités (striction, plissement,...). Les efforts et distributions de déformation obtenus dans ces opérations d'emboutissage sont fortement sensibles au comportement plastique (écrouissage, anisotropie...), et aux conditions de frottement entre les outils et la tôle, c'est-à-dire aux paramètres tribologiques et rhéologiques du procédé. Il existe donc un fort besoin de modélisation du procédé qui permettrait d'éviter de longues et coûteuses séquences d'essais - erreurs - corrections.

Ce chapitre fournit d'abord une brève description des techniques usuelles d'emboutissage. Puis il s'attache à l'analyse de la striction en emboutissage, en détaillant les aspects expérimentaux des limites de formage. Les Courbes Limites de Formage (**CLF**) introduites pour prédire la limite supérieure de formage de la tôle avant l'apparition de la striction, sont plus particulièrement analysées. Nous verrons comment les paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau peuvent influencer sur ces déformations limites.

II.2. TECHNIQUES DE L'EMBOUTISSAGE

Avant la réalisation des emboutis dans un outil sous presse, tout un processus d'étude doit être respecté pour permettre une bonne fiabilité de la production en série de la pièce.

Au départ, le concepteur de la pièce finie prend en compte l'environnement de cette pièce, mais aussi le cahier des charges mécanique pour définir la géométrie la mieux appropriée, ainsi que l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques du matériau, Il est important pour lui de savoir si les contraintes dues à la géométrie et au matériau sont compatibles entre elles et si le procédé de transformation permet d'obtenir la géométrie, tout en garantissant une bonne tenue mécanique.

La gamme de formage représente la succession des opérations nécessaires pour obtenir la pièce finie. Elle comprend les étapes suivantes :

- découpe de la forme du flan de départ.
- Une ou plusieurs opérations d'emboutissage qui correspondent à plusieurs profondeurs d'emboutissage ou à plusieurs formes d'ébauche.
- Des opérations de finition plus ou moins importantes et difficiles selon la géométrie: poinçonnage, ajourage, relevage des bords, calibrage,...

II.2.1. Conception de l'outil d'emboutissage

L'emboutissage consiste à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur (< 3 mm) pratique à l'aide de presses à emboutir de fortes puissances munies d'outillages spéciaux qui comportent dans le principe, trois pièces : (Figure II-1)

- Une matrice dont une partie de la forme est la forme femelle de la pièce et l'autre partie correspond à la forme de serre-flan.
- Un poinçon, dont la forme correspond à la géométrie de l'embouti à réaliser.
- Un serre-flan généralement annulaire, qui permet de contrôler l'écoulement du métal dans un passage calibré en plaquant le flan sur la matrice.
- Des jons sont parfois utilisés pour freiner le glissement de la tôle

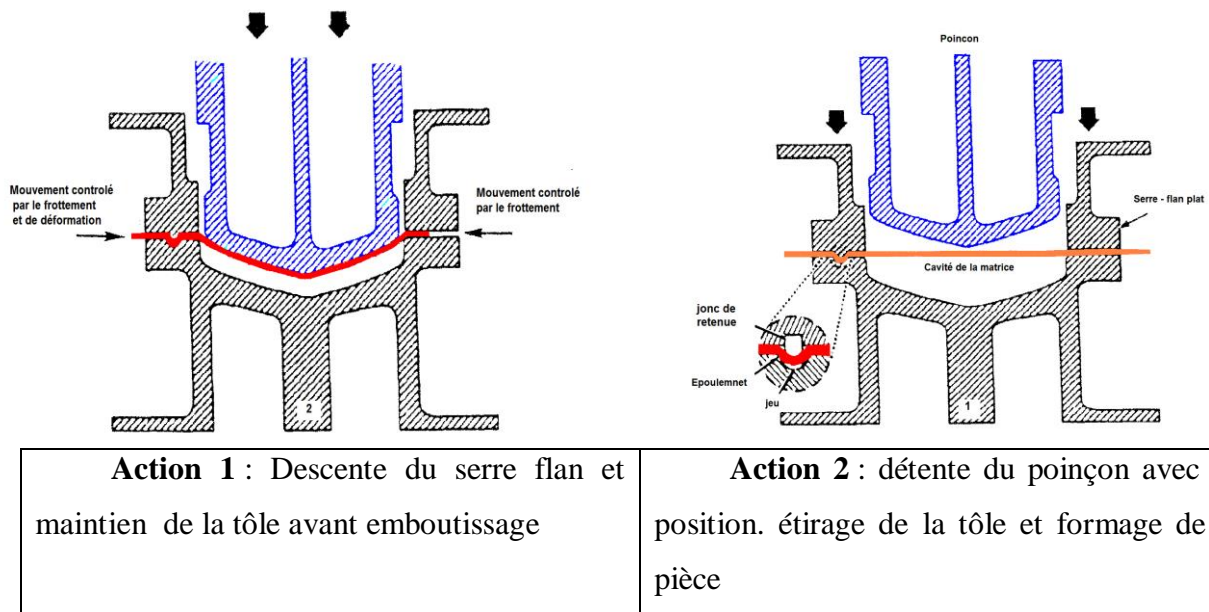


Figure II- 1: Description de l'outil d'emboutissage

Le serre-flan presse le métal contre la matrice et contrôle son écoulement le long du poinçon. La forme du flan de départ a une grande importance : il permet de maîtriser et d'orienter l'écoulement du métal dans des directions privilégiées en fonction de la forme de la pièce. Pour minimiser la quantité de matière mise en jeu ou pour maîtriser l'écoulement, l'emboutisseur utilise dans la zone sous serre-flan des moyens mécaniques de blocage ou freinage appelés jons.

II.2.2. Comportement d'une tôle dans un outil d'emboutissage

En analysant les mécanismes de déformation d'un matériau dans un outil de formage. Il n'y a que deux actions mécaniques transmises par la presse : (Figure II.2).

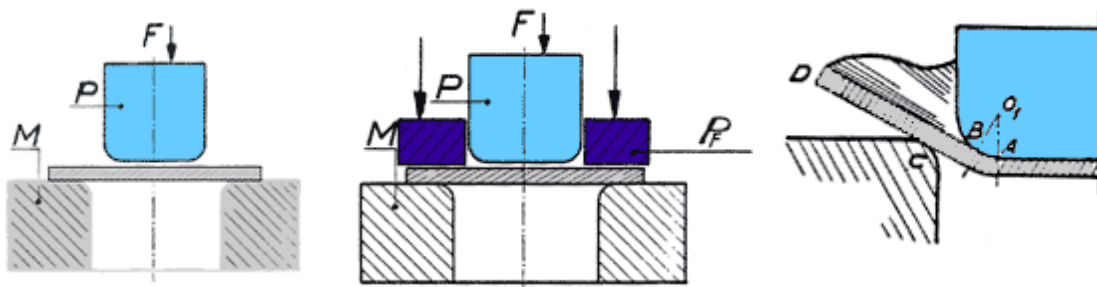


Figure II- 2: Forces appliquées

- Une force motrice générée par le poinçon. Elle va déformer le flan et l'obliger à prendre sa forme dans la matrice.
- Une force perpendiculaire au plan de la tôle assurant la pression du serre-flan.

Le poinçon dans sa descente vient en contact avec la tôle puis l'oblige à se fermer progressivement sur son contour suivant l'arc **BO1A**, la partie opposée de la matière s'appuyant en **C** sur la matrice, prend la forme conique **D**.

On remarque dans ce mouvement que des plis se forment sur la pièce en œuvre. Ces plis vont augmenter d'amplitude au fur et à mesure du déroulement de l'opération d'emboutissage et empêcher par coincement l'écoulement de la matière entre matrice et poinçon.

Le poinçon poursuit sa course, et casse la pièce du fait que le processus de déformation plastique est interrompu.

Pour éviter cette formation de plis sur la pièce en œuvre, on adjoint à l'outil d'emboutissage un troisième élément actif nommé "serre-flan" ou "presse-flan".

Ce serre-flan monté sur pression additionnelle réglable, permet de conserver l'épaisseur originelle sans formation de plis [6].

II.2.3. Problèmes rencontrés par la tôle

- Lors de l'opération d'emboutissage la tôle va réagir de différentes façons : des contraintes vont être localisées au niveau des points d'attaque et d'entraînement de la matière en provenance de la zone sous serre-flan.

- Des contraintes de compression vont généralement apparaître sous serre-flan et dans les zones en brins libres (où le métal n'est pas soutenu), car les points correspondants vont subir un avalement.

- Des contraintes localisées apparaissent aussi lors de l'écoulement du métal sur le rayon d'entrée matrice. Si le rayon matrice est trop petit, il peut y avoir rupture de la tôle, par contre si le rayon est trop grand des plis peuvent apparaître car le métal n'est pas maintenu par le serre-flan.

- Des contraintes résiduelles en fin de cycle de formage, dues à des répartitions nonhomogènes des déformations, vont entraîner une modification de forme de l'embouti lorsqu'il va être sorti de l'outillage. Ce phénomène est appelé « retour élastique ».

- Des problèmes de grippage peuvent apparaître lorsque les pressions de contact dans l'outil sont trop élevées.

II.2.4. Différents modes de déformation

Analysons maintenant les différents modes de déformations possibles en emboutissage à partir des considérations précédentes.

La Figure II-3 représente différents trajets de déformation linéaires, ainsi que les différentes zones caractérisant le mode de déformation subi par la tôle. Cette représentation est effectuée dans les axes des déformations principales dans le plan de la tôle.

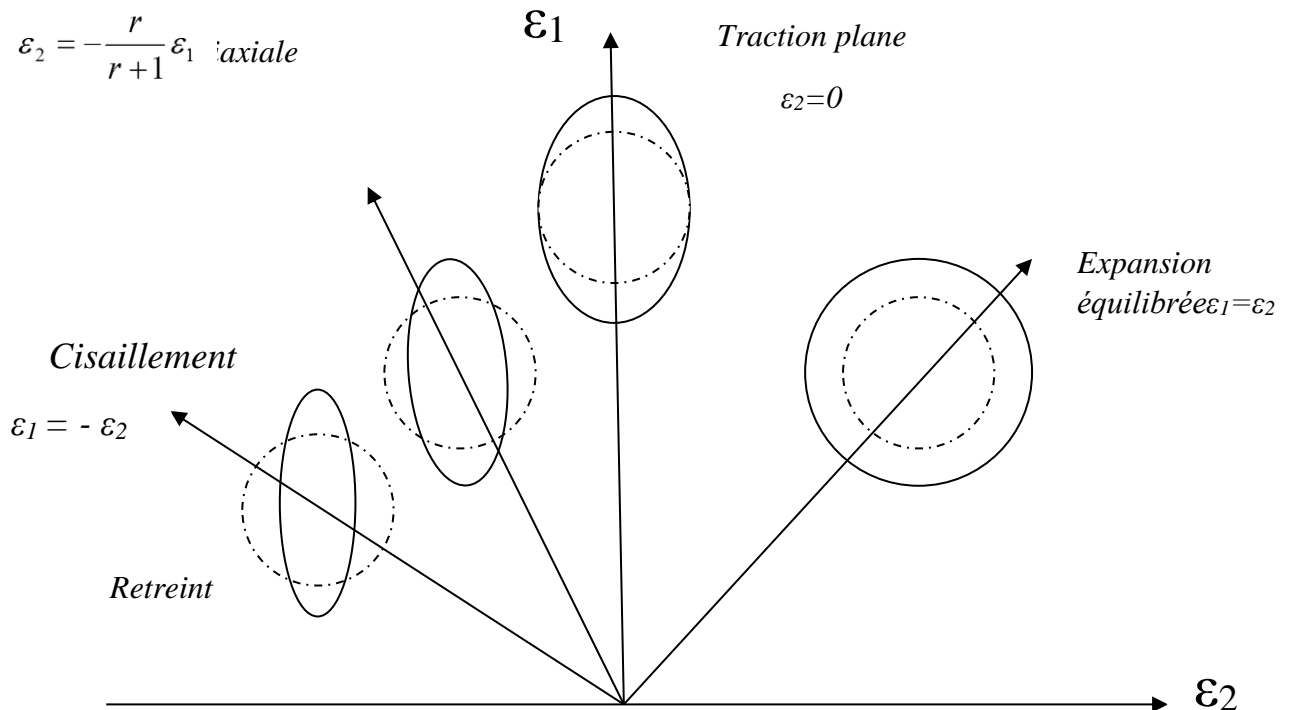


Figure II- 3: Diagramme de différents tests de déformation dans le plan des déformations principales de surface de la tôle.

Sur le diagramme apparaissent les différentes déformations possibles sur un embouti, qui peuvent être visualisées par les modifications d'un réseau de cercles ou de carrés préalablement déposés sur le flan avant l'emboutissage. Les différents chemins ou types de déformation rencontrés sont définis par :

- **L'expansion équilibrée** $\epsilon_1 = \epsilon_2$: cela correspond à ce qui se passe au nez du poinçon au début du formage, elle est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous serre-flan. Les deux déformations sont positives, $\epsilon_1 \text{ et } \epsilon_2 > 0$, un cercle se transforme en cercle de plus grand rayon ou en ellipse de plus grande surface. Par suite de conservation du volume, l'épaisseur diminue donc et on a : $\epsilon_1 + \epsilon_2 = -\epsilon_3$, avec $\epsilon_3 < 0$ (négative), ϵ_3 est la déformation en épaisseur.

- **La traction plane** : cela correspond aux déformations dans les parois verticales de l'embouti, qui sont générées par la tension dans la tôle pour entraîner la matière sous serre-flan ou pour marquer une forme en fin de formage lorsque la matière ne peut plus beaucoup glisser dans l'outil. $\epsilon_2 = 0$ (pas de variation de largeur). On a donc : $\epsilon_1 = -\epsilon_3$, l'épaisseur varie exactement à l'inverse de la longueur.

• **Traction uni axiale ou extension**: ce type de déformation est associé à des déformations négatives bien que la contrainte correspondante soit positive. Cela correspond à ce qui se passe sur une éprouvette de traction uni axial.

Les déformations se trouvant dans les zones de traction uniaxial sont situées sur une trajectoire défini par le coefficient d'anisotropie r , $r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$

• **Le cisaillement** : c'est le trajet idéal de formage, toute déformation en traction est compensée par une déformation en compression ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$) tout en maintenant l'épaisseur constante ($\varepsilon_3 = 0$). Ce type de sollicitation serait obtenu dans la zone sous serre-flan si la pression était suffisante pour empêcher tout épaissement de la tôle.

En conséquence l'amincissement se trouve au-dessus de cette trajectoire de déformation et l'épaissement est au-dessous.

• **Le rétreint** : ce type de chargement est observé dans les zones de l'embouti subissant un avalement il s'accompagne d'un épaissement de la tôle.

II.3.REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES REFERENCES CONSULTEES

II.3.1. ESSAIS DE LABORATOIRE

Nous présentons maintenant les différents types d'essais de laboratoire usuels servant à caractériser le comportement plastique et la formabilité des tôles.

II.3.1.1. Essai Jovignot ou essai de gonflement hydraulique

Le flan est bloqué sur la matrice et par pression hydraulique, il est gonflé sur une matrice présentant une ouverture circulaire ou elliptique (Figure II-4) [7].

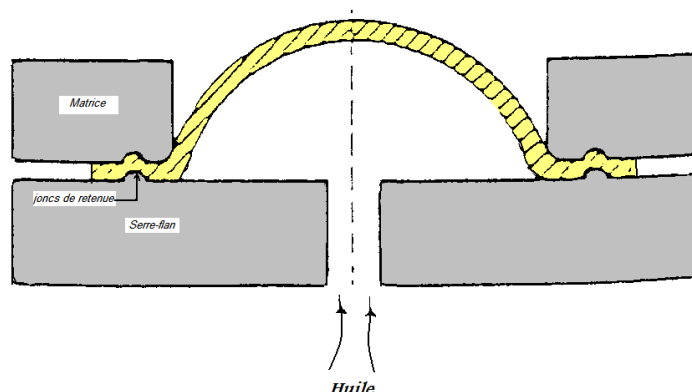


Figure II- 4: Essai Jovignot

L'écoulement est contrôlé par des joncs de retenue situés sous le serre-flan. Cet essai est apprécié car il donne des mesures sans frottement et permet de connaître les caractéristiques de la tôle dans le domaine de l'expansion ($\rho = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 0$).

Les états de déformation et de contrainte bi axiaux peuvent être déterminés à partir de la pression du fluide, du rayon de courbure et de l'épaisseur. Le gonflement hydraulique a les applications suivantes :

- Caractérisation intrinsèque du matériau en traction bi axiale.
- Caractérisation de l'écrouissage à des niveaux de déformation plus élevés qu'en traction uni axiale.

II.3.1.2. Essai Swift ou de coupelle profonde

Le plus courant des tests utilisés pour l'emboutissage profond est l'essai Swift. Cet essai consiste à emboutir à l'aide d'un poinçon à fond plat un flan circulaire maintenu entre matrice et serre-flan. Cet essai est très sensible au frottement tôle - outil. Le mode de déformation est le rétreint : $\rho < 0$. L'emboutissabilité est exprimée par un rapport limite d'emboutissage noté LDR (Limiting Drawing Ratio). Pour un rayon de poinçon considéré ce rapport est donné par :

$$\text{LDR} = \text{Rayon du flan non déformé} / \text{Rayon du poinçon}$$

Ce rapport définit la valeur limite qu'il est possible d'effectuer en une seule passe sans obtenir de rupture de l'embouti [8].

II.3.1.3. Essai Nakazima

Cet essai (Figure 11-5) consiste à emboutir sur un poinçon hémisphérique des bandes de différentes largeurs. On couvre ainsi avec un seul outil toute la gamme des déformations ce qui permet de réaliser des Courbes Limites de Formage, mais avec frottement. Ce test est appelé test mixte car il fait intervenir l'expansion et l'extension [9].

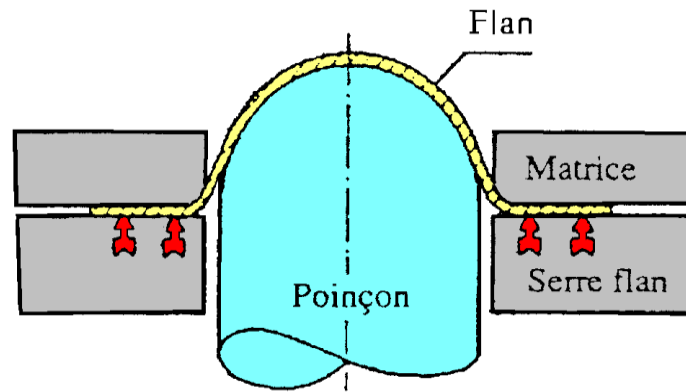


Figure II- 5: Essai Nakazima

II.3.1.4. Essais de traction

Les CLF sont par définition déterminées par des trajectoires de déformation rectilignes, telles que le rapport ρ des déformations principales ϵ_1 et ϵ_2 reste pratiquement constant tout au long de la déformation. Le coefficient de Lankfort ρ est donné par l'expression suivante :

$$\rho = \frac{\epsilon_{\text{latéral}}}{\epsilon_{\text{épaisseur}}} = \text{constante}$$

Une géométrie élancée d'éprouvette (Figure II.6) permet de réaliser une sollicitation de traction simple : $\epsilon_2 = (-r/(1+r)) \cdot \epsilon_1$ où r est le coefficient de d'anisotropie. Par contre, les géométries très courtes (éprouvette de traction large) ou présentant des entailles (éprouvette de traction entaillée) permettent de se rapprocher d'un état de déformation plane [10].

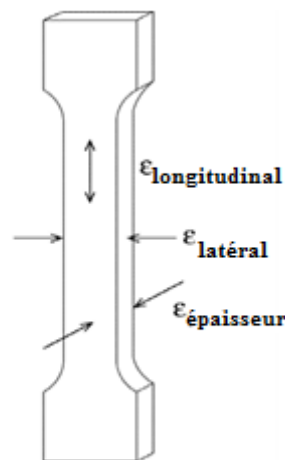


Figure II- 6: Différentes déformations mesurées lors d'un essai de traction

II.3.1.5. Essai Marciniak

Cet essai (Figure II-7) (avec le gonflement hydraulique) permet de déterminer les propriétés des tôles métalliques en traction bi axiale, sans avoir le désavantage d'un contact et donc d'un frottement avec un poinçon solide.

Cet essai peut être réalisé en utilisant un poinçon cylindrique de section carrée, elliptique ou circulaire. Ce poinçon possède un fond plat évidé et un contre-plan est utilisé pour obtenir une zone déformée plane sans surface de frottement [11].

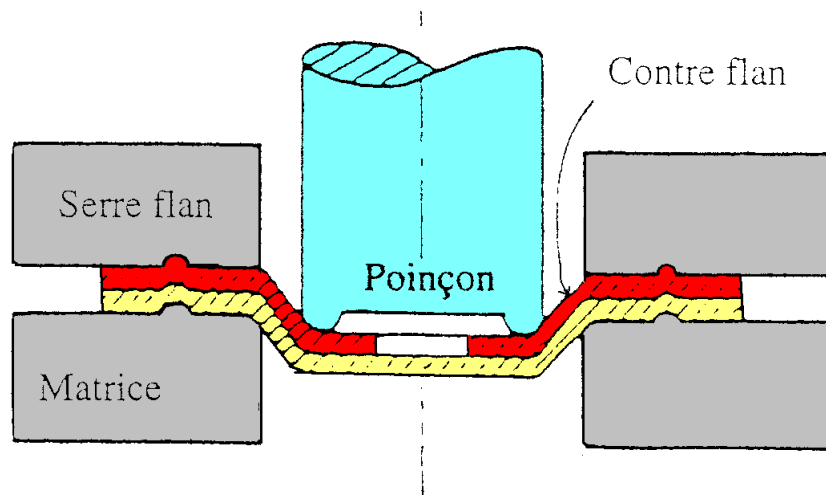


Figure II-7: Essai Marciniak.

Le test a les applications suivantes :

- Détermination des déformations limites du matériau en traction bi axiale, par traction dans le plan de la tôle et sans contact avec le poinçon dans la zone utile.
- Application à des tôles de grandes dimensions pouvant être ensuite utilisées dans d'autres tests. Afin de déterminer les effets de trajets de déformation complexes sur l'écroutissage et les niveaux des déformations limitent.
 - Détection des défauts Comme les inclusions, par application de grandes déformations uniformes sur des éprouvettes de grandes dimensions.

II.4. ASPECTS EXPERIMENTAUX DE LA STRICTION DES TOLES

II.4.1. Présentation des Courbes Limites de Formage "CLF"

La notion de courbe limite de formage (CLF) a été introduite par Keeler [12] lorsqu'il observa que l'allongement local maximum était insuffisant pour déterminer le niveau de déformation possible

pour une tôle. Il constata qu'en reportant sur un même diagramme les valeurs respectives ε_1 et ε_2 des allongements à rupture dans les deux directions principales des déformations de surface, tous les points $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ se situaient sur la même courbe la CLF. Cette courbe initialement limitée au quadrant $\varepsilon_2 > 0$ a été complétée dans le domaine de l'extension ($\varepsilon_2 < 0$) par Goodwin [13].

Cette CLF à rupture représente la limite supérieure de déformation d'une tôle. Cette courbe s'est révélée insuffisante car le phénomène de rupture ductile est en général précédé par le phénomène de striction localisée. Celui-ci se traduit par un amincissement local qui est inadmissible tant pour des raisons de résistance mécanique que pour des raisons esthétiques. Aussi, la courbe limite à striction a été introduite pour prédire la limite supérieure de formage de la tôle avant l'apparition de l'instabilité.

Sur le diagramme des déformations principales de surface de la tôle. La courbe limite de formage à striction est la frontière qui sépare les états de déformations correspondant au succès et à l'échec d'un embouti. Elle est obtenue en réalisant les différents trajets de déformation susceptibles d'entraîner la striction des pièces à emboutir (Figure II-8). Pour des raisons de symétrie, et compte tenu des conditions d'apparition de la striction, la zone de représentation des limites de formage est comprise entre deux trajets extrêmes : l'expansion équi-biaxiale et la traction uni-axiale.

Les CLF sont par définition déterminées pour des trajectoires de déformation rectilignes, c'est-à-dire que le rapport ρ des déformations principales ε_1 et ε_2 reste pratiquement constant tout au long de la déformation soit : $\varepsilon_2 = \rho \cdot \varepsilon_1$

Ces courbes sont de plus en plus fréquemment utilisées dans l'industrie pour évaluer les chances de réussite ou d'échec d'un embouti et pour essayer de diagnostiquer les causes

d'un échec éventuel. Cependant une des limitations à l'emploi généralisé des CLF est due au fait qu'elles dépendent largement de l'histoire de déformation du matériau caractérisée par la trajectoire de déformation.

De nombreux travaux expérimentaux ont en effet montré que le niveau des limites de formage est très largement influencé par la forme des trajectoires de déformation. Ainsi dans le cas de trajectoires de déformation brisées constituées de deux ou plusieurs segments le long desquels $d\varepsilon_2/d\varepsilon_1 = \text{cte}$, il est maintenant bien connu par exemple qu'une pré déformation par expansion abaisse le niveau des limites de formage tandis qu'une pré déformation par traction en élève le niveau.

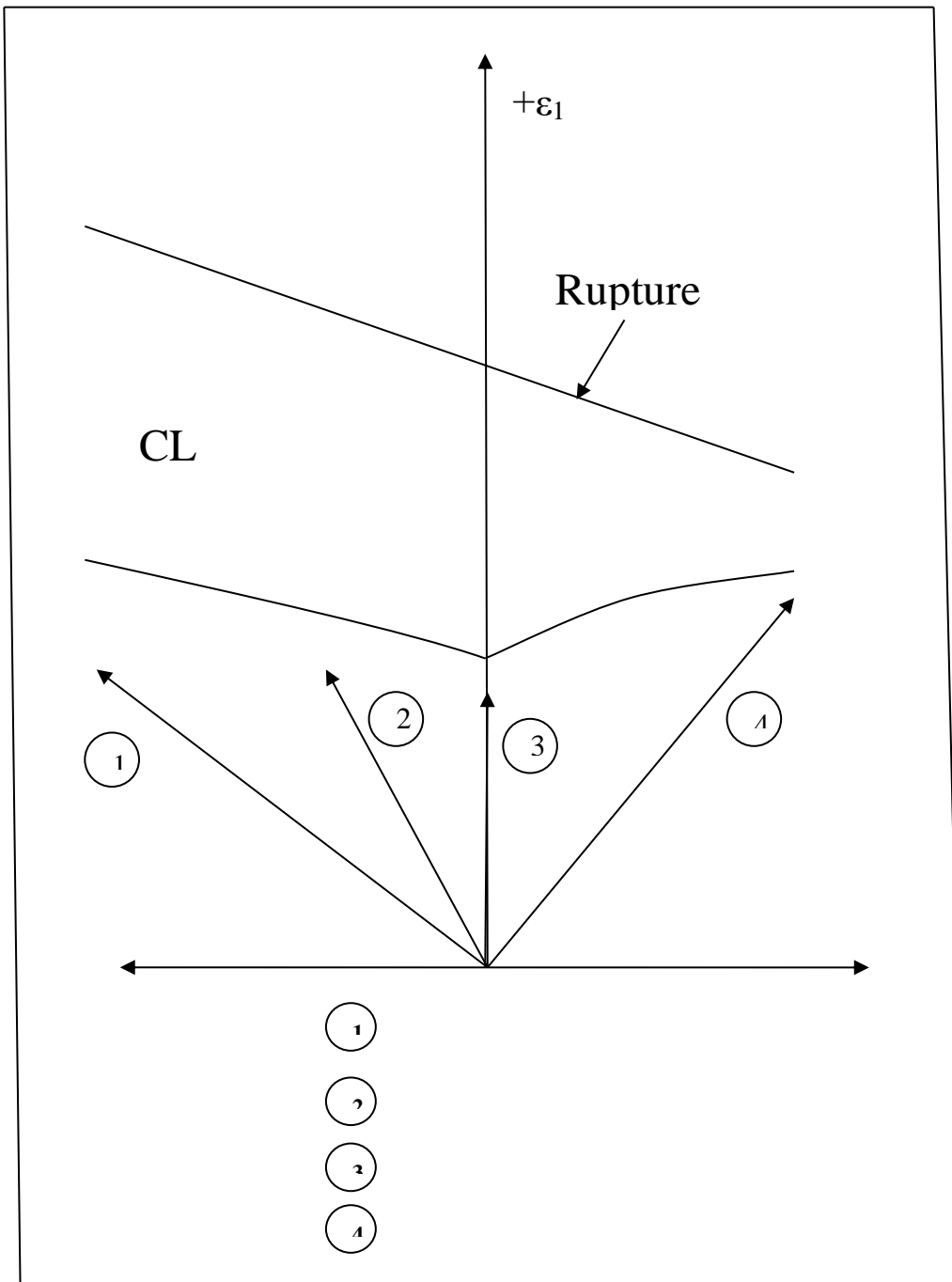


Figure II- 8: Diagramme schématique de limite de formage avec différents trajets

Pour la plupart des métaux, les CLF ont la forme présentée sur la Figure I-8, mais la position verticale de la courbe dépend de l'épaisseur de la tôle, de la valeur de l'exposant d'érouissage et du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation. L'intersection de la courbe avec l'axe vertical, qui correspond à la déformation plane, est aussi le minimum de la courbe. On observe expérimentalement, sur un matériau donné, une augmentation linéaire de la déformation limite en traction plane avec l'épaisseur.

Le diagramme standard est basé sur l'approximation d'un chemin de déformation quasi rectiligne. Les diagrammes générés par une déformation uniaxiale succédant à une déformation biaxiale, ou l'inverse, diffèrent considérablement du diagramme standard. Pour cette raison, les effets des trajets de déformation doivent être pris en compte quand on utilise un diagramme pour analyser un problème de formage.

II.5. Influence des paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau sur les CLF

II.5.1. Influence de la sensibilité à la vitesse de déformation

Une sensibilité à la vitesse de déformation peut être introduite en définissant la contrainte équivalente sous la forme suivante :

$$\sigma = K (\varepsilon + \varepsilon_0)^n \dot{\varepsilon}^m$$

Où σ est la contrainte équivalente, K est le coefficient de résistance plastique (constante), ε est la déformation équivalente, ε_0 est la déformation initiale équivalente, n est l'exposant d'écrouissage et m le coefficient de sensibilité à la vitesse.

II.5.2. Effet de la température

L'influence de l'échauffement engendré par les déformations plastiques peut être importante aux grandes vitesses de déformation. Il est connu que la plus grande partie de l'énergie de déformation plastique est dissipée sous forme d'énergie thermique (environ 90 %). Si la déformation est rapide ou si le matériau est faiblement conducteur, une augmentation locale de la température peut conduire à une localisation thermoplastique.

Quand la température augmente, la limite d'écoulement diminue (matériau thermo-adoucissant). Par suite la déformation plastique va être favorisée par le défaut et le couplage thermomécanique accélère la localisation.

II.5.3. Influence du coefficient d'anisotropie

Graf et Hosford ont étudié l'influence du coefficient d'anisotropie sur les déformations limites en expansion en utilisant le critère quadratique de Hill. Ils se limitent au cas particulier d'une tôle présentant une anisotropie normale au plan de la tôle. L'exemple est pris avec une valeur du défaut égale à 0,98 et un coefficient d'érouissage de 0,2 [14].

II.5.4. Influence de l'exposant d'érouissage

Graf et Hosford ont trouvé qu'une augmentation du coefficient d'érouissage élève le niveau de la déformation limites, de façon comparable au coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation [14].

II.6. PROBLEMATIQUE

L'aptitude à l'emboutissage des tôles minces peut-être évaluée au moyen d'essai simulatifs tel que Jovignot, Swift, Nakazima, traction, ou Marciniak par exemple. Ces essais présentent l'inconvénient outre qu'ils font intervenir des facteurs difficilement contrôlables, (état de surfaces, lubrification, vitesse des essais, température, ...) de se traduire par des indices dont les variations ne permettent que difficilement de distinguer les qualités des tôles pourtant différentes.

On tend depuis quelques années à leur adjoindre deux nouvelles caractéristiques : le coefficient d'anisotropie « r » et le coefficient d'érouissage « n ». Le premier est fortement lié à l'aptitude du treint d'une tôle, le second à la capacité de déformation en expansion.

Ces deux caractéristiques mécaniques qui font l'objet de garanties dans les normes de produit ou qui attestent la conformité d'une fabrication sont déterminées suivant des processus normalisés : tel que les essais de traction et les essais non destructifs tel que les jauges d'extensométrie.

Les résultats qu'ils fournissent ne sont pas des indications absolues, mais constituent une échelle de valeurs comparatives étroitement liées aux conditions d'exécution des essais [14].

Dans ce cadre général nous nous proposons le contrôle de l'aptitude de formabilité de la tôle se basant sur la mesure des coefficients d'érouissage « n » et d'anisotropie « r », et juger le degré de sévérité de l'embouti en traçant la courbe limite de formage. Ces courbes sont de plus en plus fréquemment utilisées dans l'industrie pour évaluer les chances de réussite ou d'échec d'un embouti et pour essayer de diagnostiquer les causes d'un échec éventuel.

Pour des raisons de symétrie, et compte tenu des conditions d'apparition de la striction, la zone de représentation des limites de formage est comprise entre deux trajets extrêmes : l'expansion équi-biaxiale (fonction du coefficient d'érouissage) et la traction uni axiale (fonction du coefficient d'anisotropie).

Connaissant ces deux coefficients, on peut tracer les deux trajectoires de déformation entre lesquelles sont admises les limites de formage avant l'apparition de la striction.

Trajectoire de l'expansion équilibrée $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$: définit par le modèle expérimental, généralement appelé relation d'Hollomon : $\sigma = f(\varepsilon^n)$, qui s'écrit :

$$\sigma = K_y |\varepsilon^n|$$

Où σ_y est la limite élastique, K_y est le coefficient de résistance plastique (constante), n l'exposant d'écroutissage, σ la contrainte de Cauchy, et ε la déformation (élasto-plastique) logarithmique.

Trajectoire de la traction uniaxiale ou extension : définit par la relation :

$$\varepsilon_2 = -\frac{r}{r+1} \varepsilon_1$$

Le coefficient d'anisotropie « r » est mesuré par jauges d'extensométries, en effet si l'on désire connaître l'allongement d'une structure suivant une direction donnée, on colle la jauge, fils parallèles à cette direction.

Pour le tracé d'une seule courbe de « CLF », il est indispensable d'utiliser un grand nombre de flans de formes différentes pour obtenir tous les modes de déformations utiles au tracé de la courbe. Chaque flan est auparavant marqué par une grille qui permettra la mesure des déformations subies par la tôle en tout point et en particulier au niveau de l'amorce de rupture. Sur les éléments de base de la grille qui peuvent être des cercles ou des carrés, on mesure les déformations dites principales, qui se trouvent portées par deux directions perpendiculaires.



CHAPTER III :
SIMULATION PAR
ABAQUS



III.1 Introduction sur *ABAQUS*

La plupart des matériaux de l'industrie mécanique doivent subir au minimum une opération d'usinage dans leurs procédés de mise en forme. Dans le but de réduire les coûts concernant les essais d'usinage (le coût matière, le coût d'utilisation des machines) et d'optimiser la conception des plaquettes, l'utilisation de l'outil numérique devient incontournable.

Un outil très utilisé pour les simulations d'essais de façon général dans le champ d'étude des matériaux est le logiciel *ABAQUS*. C'est un logiciel qui résout les problèmes de diverse champs par la technique des éléments finis.

Cette étude repose principalement sur *ABAQUS* et sur les résultats trouvés, et il faut toujours comparer avec des essais réels pour bien soutenir les faits exprimés ici.

On va se concentrer sur les résultats pour la température, les déformations et contraintes dans l'éprouvette de traction traité. Mais on aurait pu aussi regarder les autres paramètres pour trouver quelques solutions.

C'est quoi *ABAQUS*?

- Code de calcul par éléments finis (créé en 1978)
 - Modèle d'emploi= géométrie discrétisée: éléments, nœuds
- Objectifs: simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures ...
- Divers domaines d'application: Mécanique, Thermique, Électrique, ...etc.
- Problèmes traités:
 - -Analyse structurale
 - -Statique et Dynamique (crash, impact,...etc.)
 - -Linéaire et non linéaire
 - -Problèmes couplés.....etc.

III.2 Parité théorique

Pour bien comprendre tout ce qui se passe dans l'éprouvette de traction, il faut avoir quelques notions théoriques par rapport au comportement du matériau qu'on va utiliser pour les simulations.

La simulation sur *ABAQUS* a été faite seulement pour un acier quelconque, donc on va analyser la réponse de ce type de matériaux aux déformations.

Les matériaux métalliques ont différentes phases pendant leurs déformations, qui vont être expliquées dans cette partie.

III.2.1 Déformation élastique

Tous les métaux ont une partie élastique au début de leur déformation. C'est facile à la trouver dans des essais réels parce que, pendant qu'on est dans cette phase, la déformation et la contrainte sont proportionnelles.

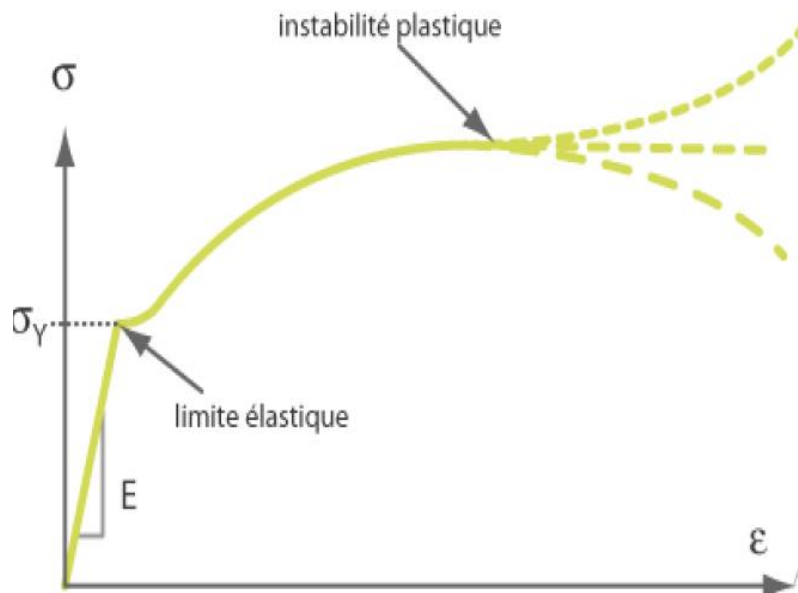


Figure III- 4: Les déformations parités des déformations (élastique et plastique)

La caractéristique principale qui montre que le métal est dans cette phase est la capacité de revenir à son état de déformation initial, sans avoir aucune contrainte résiduelle. Ça veut dire qu'il revient à son état de contraintes original.

Dans la zone élastique l'ordre des charges appliquées au matériau n'est pas indispensable pour comprendre et prédire son comportement.

III.2.2 Déformation plastique

La phase suivante de déformation des matériaux métalliques est la partie plastique. Cette phase est la plus intéressante dans notre étude car c'est la partie qui provoque l'échauffement de chaleur qui nous intéresse.

On va expliquer quelques concepts qui interviennent dans le processus de déformation plastique d'un solide et qui sont en relation avec la variation de l'énergie thermique.

Une dislocation est un défaut linéaire autour des atomes qui sont désalignés. Cela provoque un plan de plus d'atomes dans la structure cristalline.

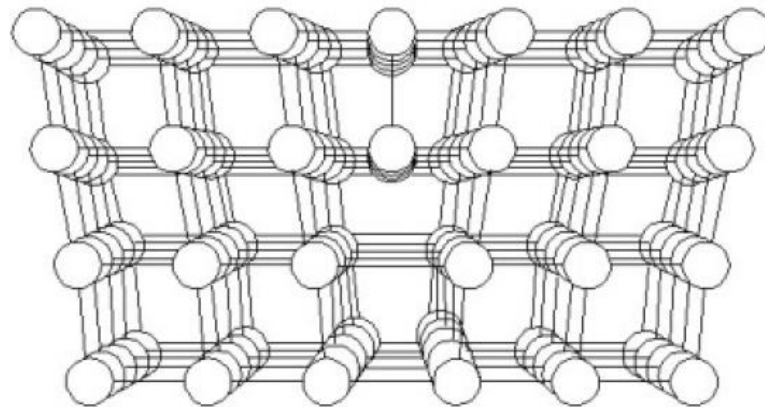


Figure III-2: une dislocation

Tous les matériaux ont ces dislocations, pour différentes raisons, comme les contraintes dues à un refroidissement rapide ou simplement pendant le procès de solidification.

La déformation plastique correspond au mouvement d'un grand nombre de dislocations. Cela s'appelle glissement et est dû à l'effort tranchant

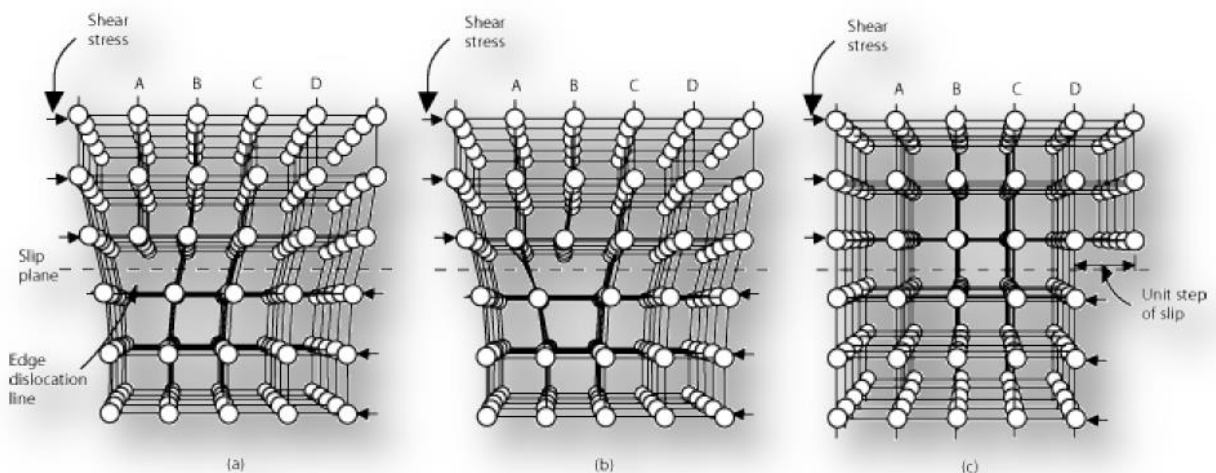


Figure III-3: Mouvement des dislocations dans le matériau.

La capacité du métal à se déformer plastiquement dépend de la densité de dislocations dans celui-ci. Si le nombre de dislocations est très petit, le matériau métallique serait fragile comme un matériau céramique.

Donc la possibilité de mouvement des dislocations est très importante dans le matériau pour sa ductilité et sa rupture. Si le mouvement des dislocations est facile, le matériau sera très ductile et moins résistant, et par contre, si les dislocations sont bloquées, le matériau sera très résistant et dur.

III.3 Parité pratique sur ABAQUS

III.3.1 Définition d’ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE

III.3.2 Description des possibilités d’ABAQUS

ABAQUS couvre presque tous les domaines de la physique et tous les types de problèmes.

III.3.2.1 Domaines physiques

- Mécanique
- Thermique
- Electrique (piézo et thermique)
- Problèmes couplés

III.3.2.2 Problèmes

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

ABAQUS offre un très large choix d’éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard).

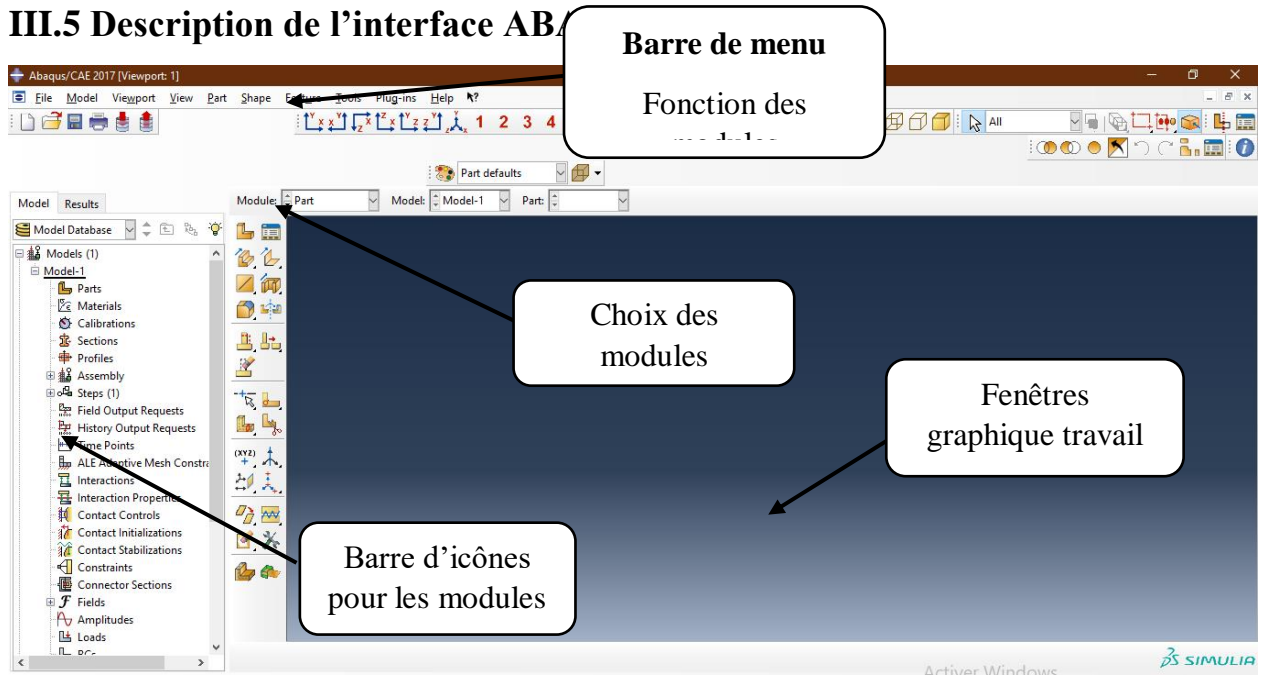
III.4 les unités

Avant de commencer de définir n’importe quel modèle sous ABAQUS, on doit décider quel système d’unités on emploie. ABAQUS n’a aucun système d’unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées dans un système d’unités conforme.

Tableau III- 1: Les unités de ABAQUS

Longueur	Mètres	Mm
Force	Newton	Newton
Pression/contrainte	Pascal	Mpa
Densité	Kg/m ³	Tonnes/mm ³
Masse	Kg	Tonnes
Température	Kelvin	Kelvin

III.5 Description de l'interface AB



Démarche : Vous devez passer successivement dans les modules (à partir de la liste déroulante):

Part : Définition et création des géométries

Property : Propriétés des matériaux

Assembly : Création d'un ensemble de part

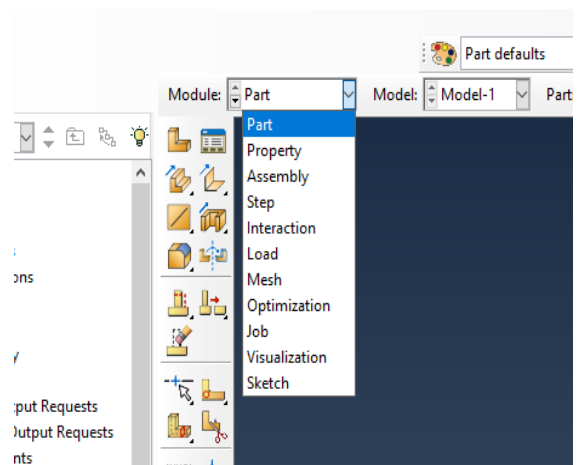
Step : Type de calcul et sorties souhaitées

Interaction : Liaisons (contacts) entre les parts

Load : Conditions aux limites du modèle

Mesh : Réalisation du maillage

Job : Paramètres et lancement du calcul



PART

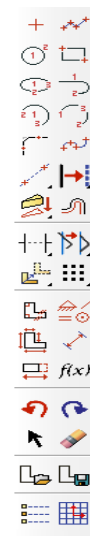
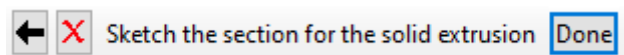
 Pour créer la géométrie 2D (ouverture de la fenêtre et des outils de dessin)

Utiliser la barre d'outils pour

Dessiner la géométrie (ne pas oublier les éléments utiles pour les CL)

Donner les dimensions

La validation se fait dans le menu du bas



PROPERTY



Création du matériau et de ses propriétés, entrez les caractéristiques d'un acier



Définissez une section solide homogène en acier



Associez la section à votre géométrie (domaine)

ASSEMBLY



Création d'instance (assemblage des entités précédentes)

STEP



Vous allez effectuer un calcul statique (pour l'instant on ne précise pas de grandeurs à conserver)

INTERACTION

Pour ce modèle il n'y en a pas

LOAD



Pour définir les chargements, ici une pression appliquée sur la surface définie

Il faut que le segment ai été défini dans PART



Pour définir vos conditions aux limites en déplacement

MESH

Vous devez préalablement sélectionner Part pour mailler votre géométrie (message d'erreur)

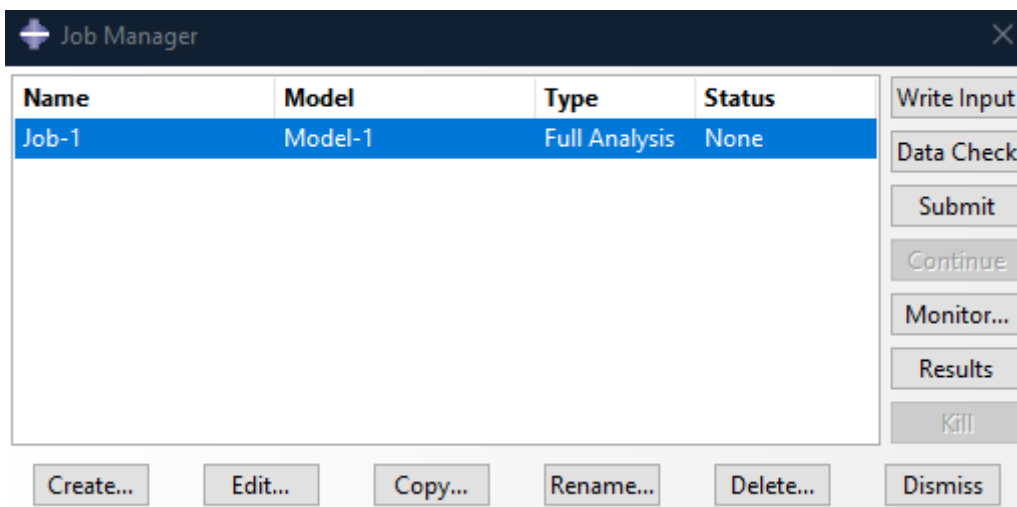


Pour définir la taille moyenne des éléments



Pour réaliser le maillage de la pièce

JOB : après avoir créé votre Job, il faut le lancer, vous pouvez le monitorer, puis voir les résultats à partir de cette fenêtre :



III.6 Expérimentation effectuée sur le logiciel

III.6.1 La géométrie de la pièce

Part :

Un échantillon en acier des dimensions suivantes est choisi pour effectuer des essais mécaniques (traction)

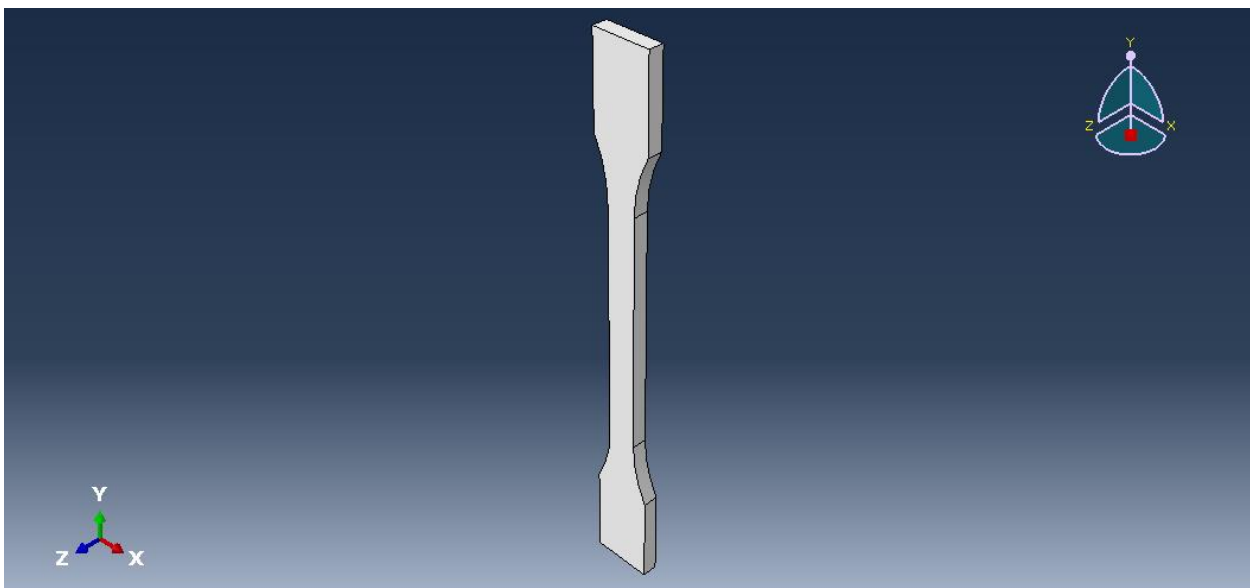
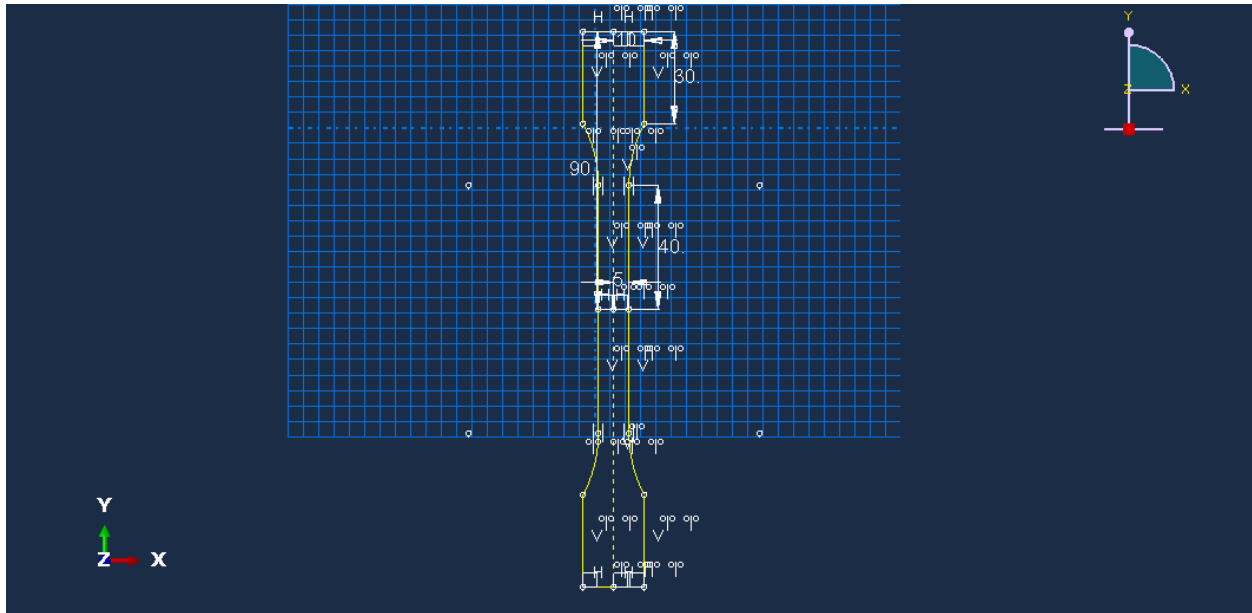


Figure III-4 : dimensions de l'éprouvette dans ABAQUS

III.6.2 Les propriétés de la pièce

Propriétés

Nous avons pris toutes les données sur les propriétés de la pièce présentées dans le tableau

Tableau III.2: les données sur les propriétés de la pièce

Les propriétés	Valeur
Nuance	Acier
Module de Young	144 Gpa
Coefficient de poisson	0.3
Densety	7800 ^e -12

III.6.3 Le chargement

Load

Dans cette étape on a fixé notre pièce en appliquant les conditions aux limites à notre éprouvette comme est indiqué ci-dessous dans la figure (III-2). L'étape ultérieure est d'exercer une force verticale d'une ampleur correspondante à la section de l'échantillon.

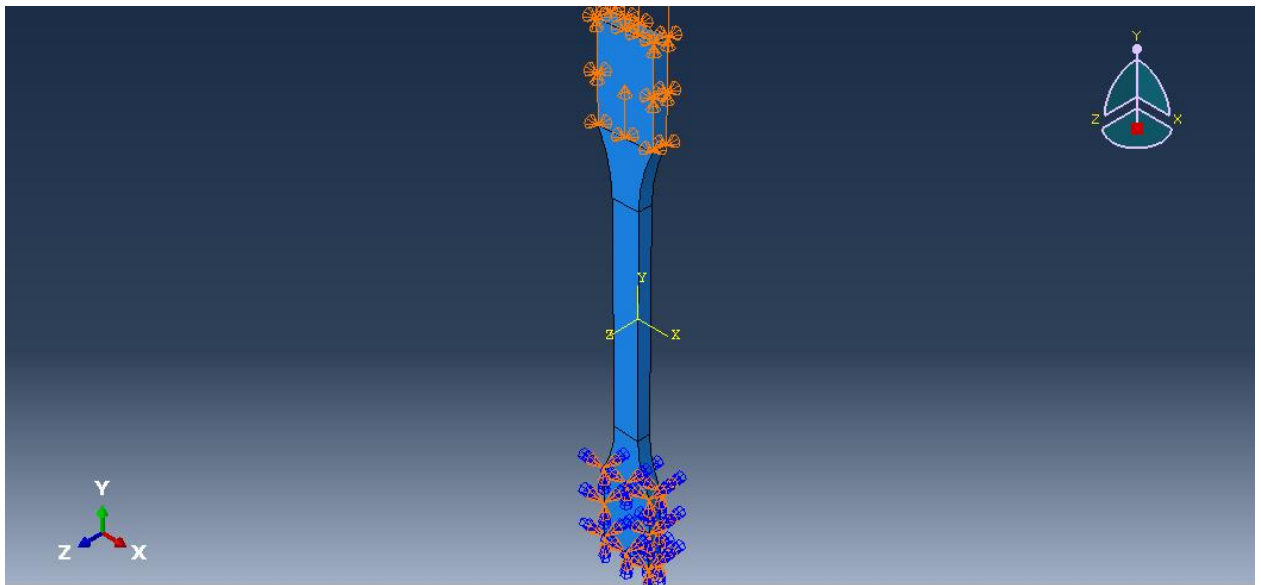


Figure III-5: Le chargement

III.6.4 Maillage

4.Mesh

La pièce est divisée en plusieurs mailles pour bien démontrer le comportement de chaque maille

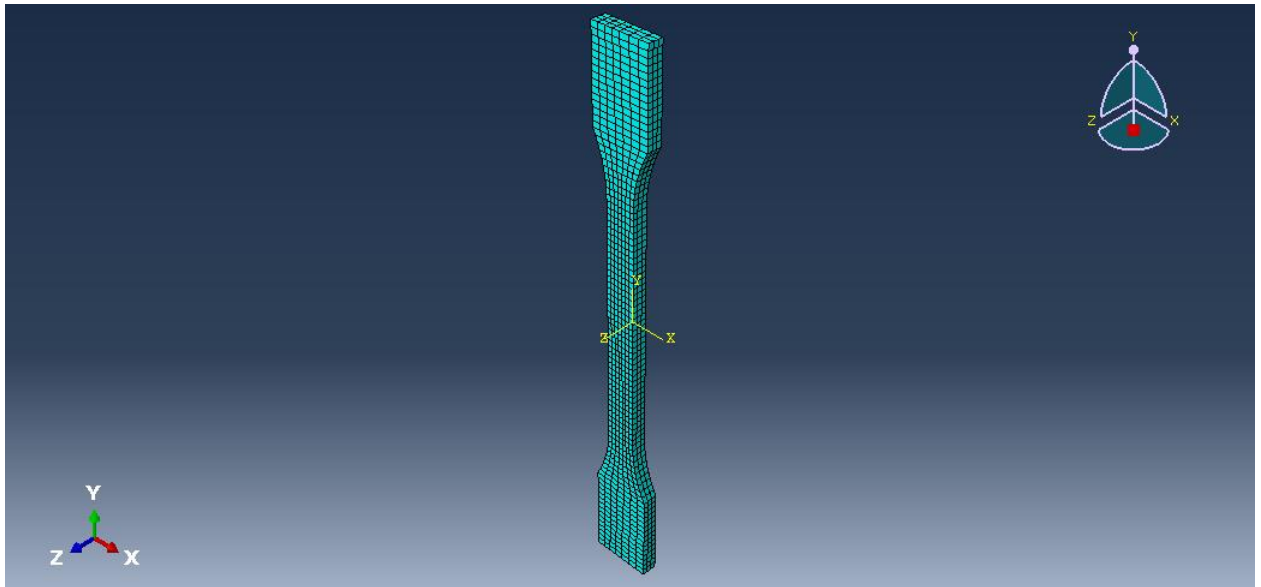


Figure III- 5: La pièce est devisée en plusieurs mailles

III.6.5 L'étape finale

Après les essais de traction réalisés sur éprouvette plate, nous remarquons les résultats suivants (Figure 4)

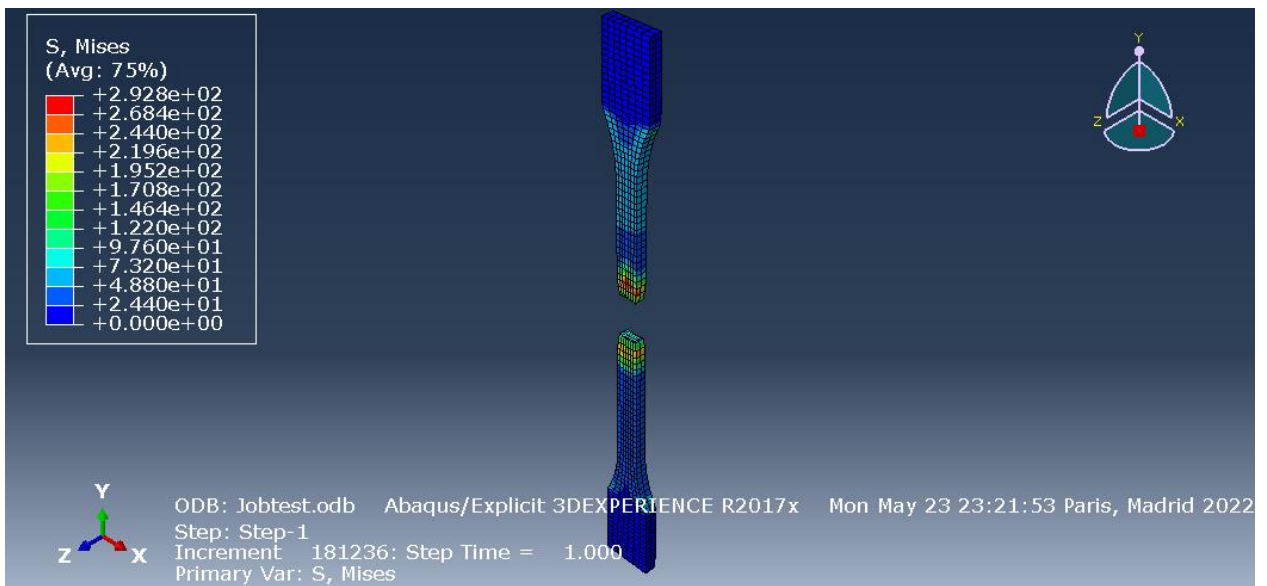


Figure III- 7: résultats des essais de traction (logiciel ABAQUS)

Nous remarquons qu'après un essai de traction sur la direction Y, un impact important sur la partie centrale ainsi que les deux extrémités de fixation de la pièce sont observé qui donne une limite élastique à.

Concernant la partie centrale de fixation et le pourtour de la pièce, l'impact est moins important.

III.6.5.1 Dans la direction 0°

Tableau III.3: les résultats de ABAQUS dans la direction 0°

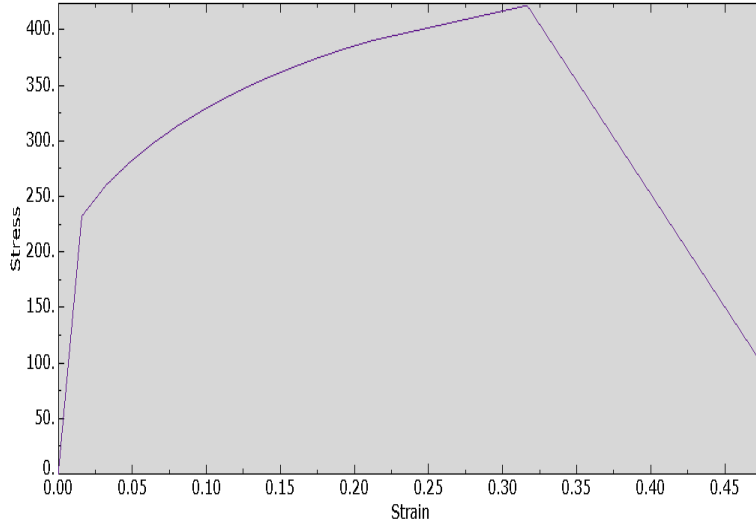


Figure III- 8: la courbe de ABAQUS dans la direction 0°

0	0
0.0158958	232.093
0.0324119	260.255
0.0486398	280.986
0.0646035	298.286
0.0804458	313.372
0.0960146	326.139
0.111726	337.866
0.127684	348.547
0.143322	357.885
0.159826	366.815
0.175014	374.475
0.191797	382.093
0.212967	390.521
0.3166	421.753
0.472405	104.795
0.474153	143.7
0.474111	123.812
0.474102	128.588

III.6.5.2 Dans la direction 15°

Tableau III.4: les résultats de ABAQUS dans la direction 15°

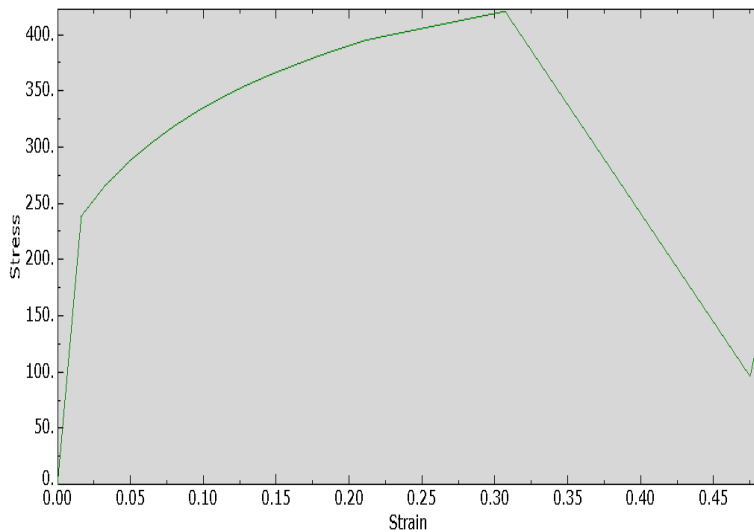


Figure III- 9: la courbe de ABAQUS dans la direction 15°

0	0
0.0163066	238.686
0.0324547	265.567
0.0495026	287.57
0.0653007	304.677
0.0800297	318.757
0.0963563	332.345
0.111907	343.535
0.128307	354.372
0.144411	363.467
0.159324	371.296
0.177146	380.131
0.190813	386.345
0.211088	395.054
0.306995	420.79
0.475102	96.0502
0.479615	123.859
0.479617	124.371
0.479579	134.877

III.6.5.3 Dans la direction 30°

Tableau III.5: les résultats de ABAQUS dans la direction 30°

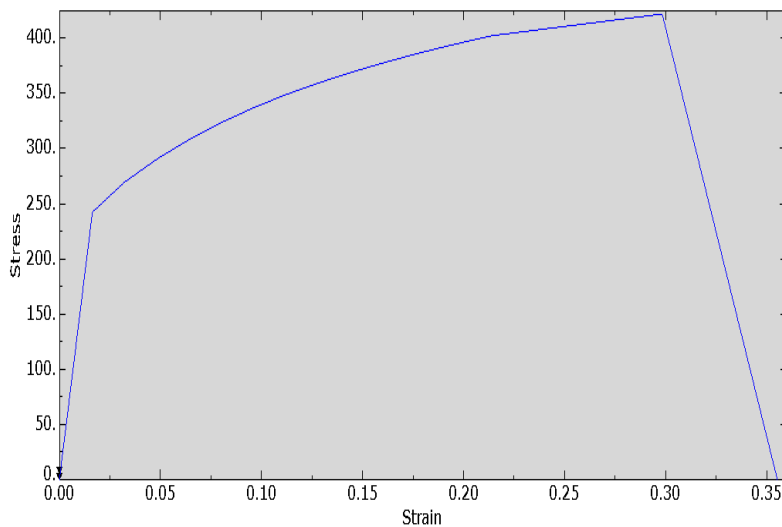


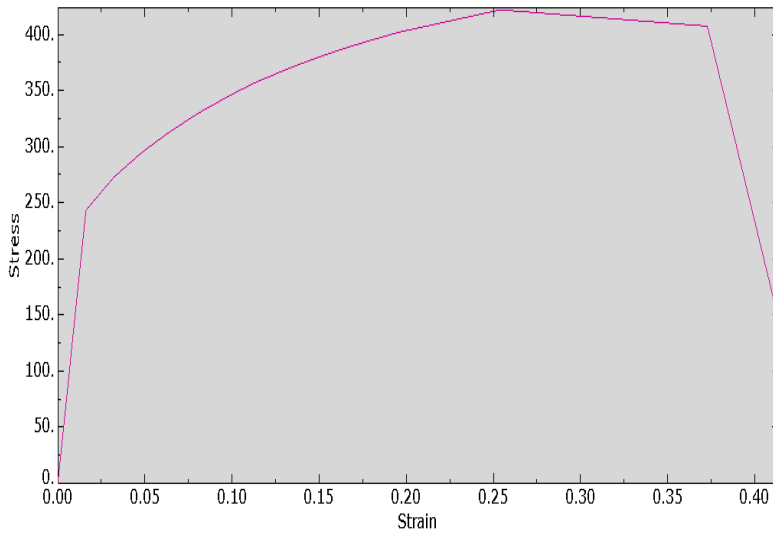
Figure III- 10: la courbe de ABAQUS dans la direction 30°

0	0
0.0163457	242.356
0.0321038	269.439
0.0489006	291.199
0.0651035	309.119
0.080086	323.502
0.0964418	337.278
0.112007	348.818
0.128308	359.46
0.144588	369.14
0.160286	377.622
0.176522	385.796
0.192287	393.032
0.213686	402.144
0.298277	421.907
0.357869	-19.0603
0.357853	-206.503
0.357833	-191.919
0.357838	-192.482

III.6.5.4 Dans la direction 45°

0	0
0.0161796	243.423
0.0324437	273.179
0.0490318	295.904
0.064673	313.624
0.080747	329.891
0.0962553	343.413

Tableau III.6: les résultats de ABAQUS dans la direction 45°



0.11206	356.309
0.127775	366.524
0.143879	376.479
0.160543	385.485
0.177314	393.681
0.196014	401.99
0.254048	421.884
0.372831	407.299
0.411578	159.551
0.41153	160.028
0.411567	157.452
0.411536	156.887

Figure III- 11: la courbe de ABAQUS dans la direction 45°

III.6.5.5 Dans la direction 60°

Tableau III.7: les résultats de ABAQUS dans la direction 60°

0	0
0.0162202	235.526
0.0321189	263.94
0.0487959	285.431
0.0645035	303.132
0.0806749	318.729
0.0959958	332.197
0.111903	344.26
0.127312	355.152
0.142418	364.914
0.158591	374.328
0.174457	382.811
0.191281	391.233
0.207506	398.833
0.228051	407.167
0.316344	430.072
0.401917	46.3246
0.401939	-16.1885

0.401936	-13.6676
----------	----------

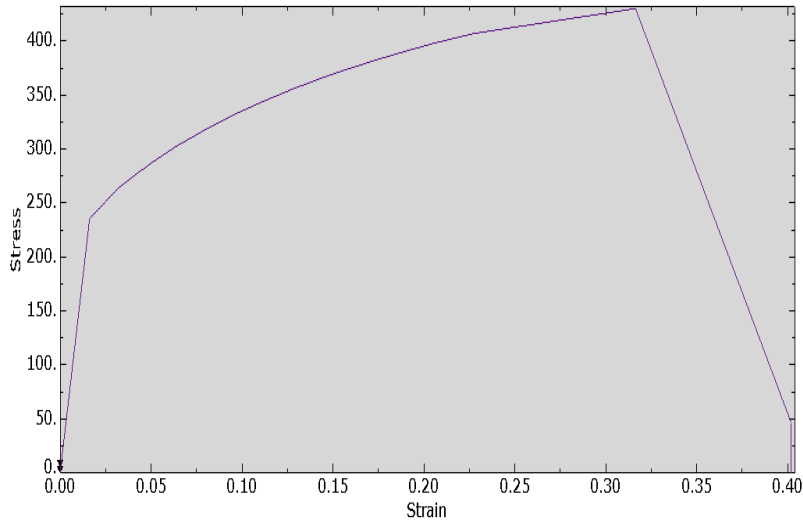


Figure III- 12: la courbe de ABAQUS dans la direction 60°

III.6.5.6 Dans la direction 75°

Tableau III.8: les résultats de ABAQUS dans la direction 75°

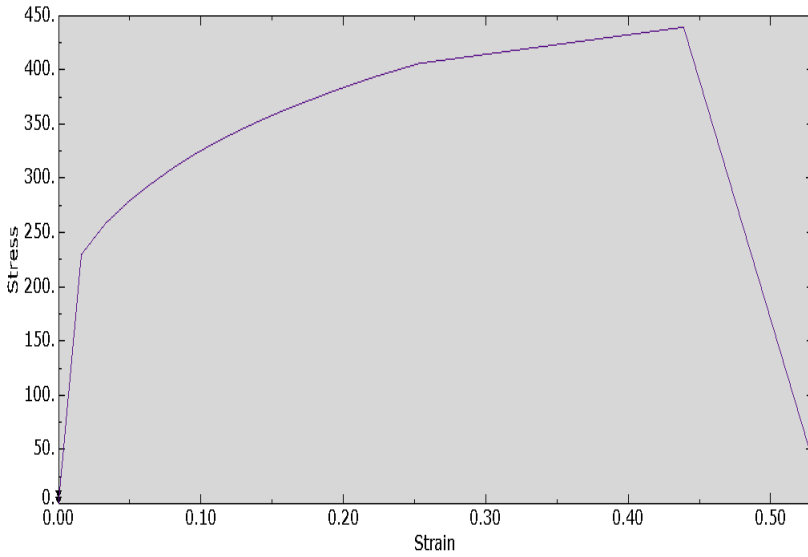


Figure III- 13: la courbe de ABAQUS dans la direction 75°

0	0
0.0160212	229.722
0.0332412	258.687
0.0487463	277.847
0.0646956	294.607
0.0808976	309.902
0.0966188	322.936
0.112206	334.404
0.12763	344.594
0.143723	354.464
0.160155	363.728
0.173579	370.532
0.190767	379.272
0.205197	385.965
0.222976	393.941
0.253161	405.854
0.438873	439.277
0.52687	51.6112
0.526849	-27.0506

III.6.5.7 Dans la direction 90°

Tableau III.9: les résultats de ABAQUS dans la direction 90°

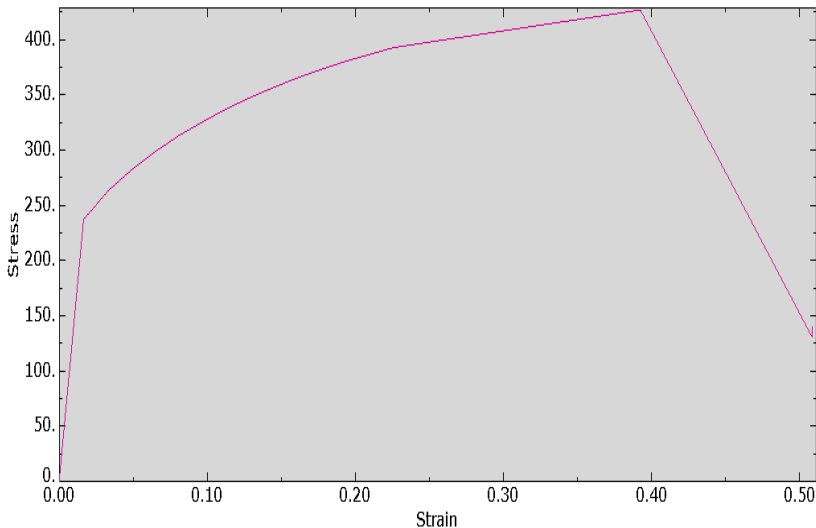


Figure III- 14: la courbe de ABAQUS dans la direction 90°

0	0
0.0165466	237.069
0.0334145	263.564
0.0497733	283.077
0.0658685	299.483
0.0813758	313.538
0.0973447	325.851
0.113129	337.33
0.128878	347.451
0.145064	356.792
0.160651	365.147
0.177688	373.315
0.194232	380.579
0.225859	392.727
0.392548	426.821
0.508393	130.949
0.508707	134.642
0.508699	137.392
0.50875	137.727

À partir des données expérimentales récupérées par nos collègues de master 2 (Malleem Nabil et Agoune Khaled) qui ont été fournis par l'entreprise du tracteur agricole (ETRAG) de contraire. Nous procédons à une contribution simulative à l'aide du logiciel ABAQUS (version2017) Tout en exploite ... Expérimentale pour étudier le comportement mécanique anisotrope des lots emboutis par le constructeur industriel

III.6.6 Les courbes combinées

III.6.6.1 Dans la direction 0°

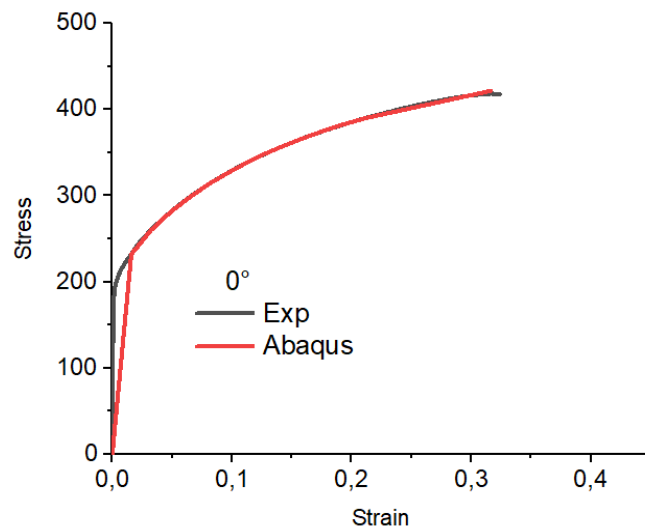


Figure III- 15: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 0°

III.6.6.2 Dans la direction 15°

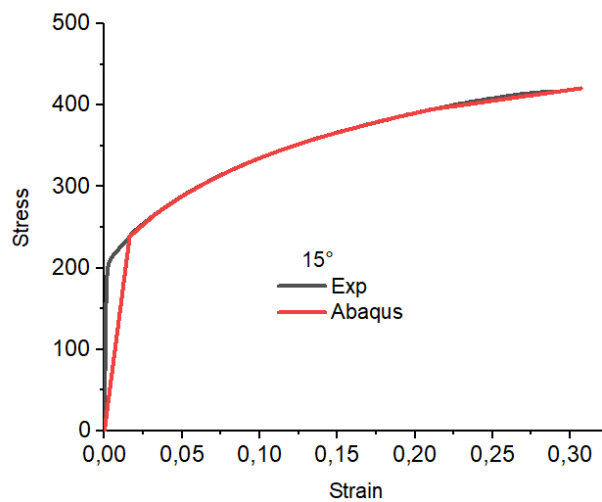


Figure III- 16 la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 15°

III.6.6.3 Dans la direction 30°

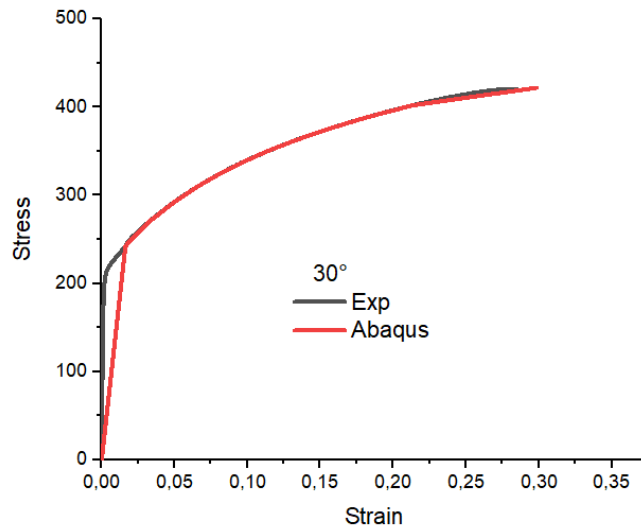


Figure III- 17: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 30°

III.6.6.4 Dans la direction 45°

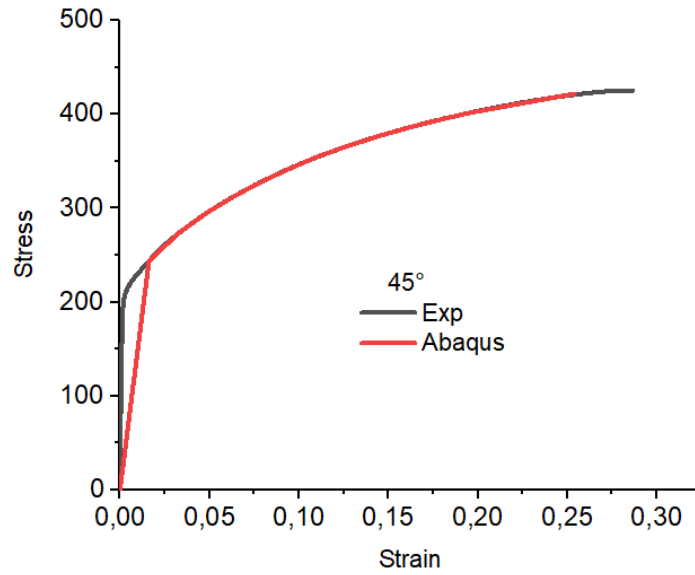


Figure III- 18: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 45°

III.6.6.5 Dans la direction 60°

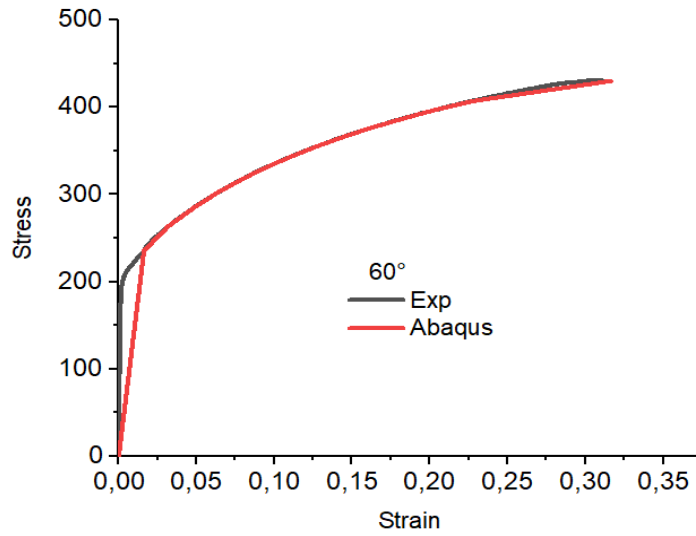


Figure III- 19: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 60°

III.6.6.6 Dans la direction 75°

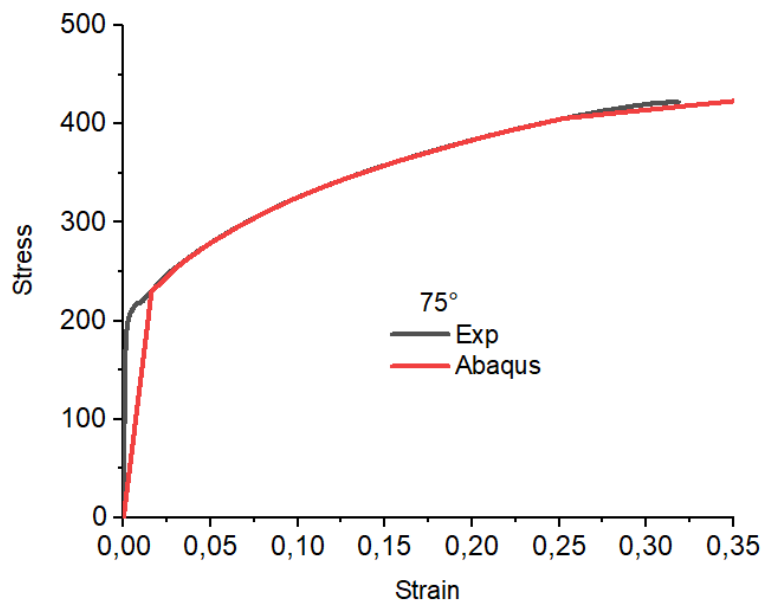


Figure III- 20: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 75°

III.6.6.7 Dans la direction 90°

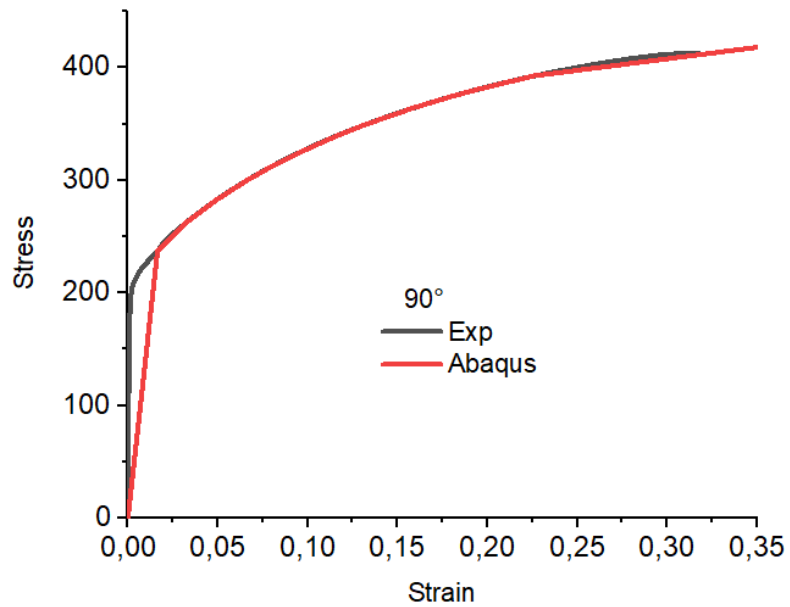
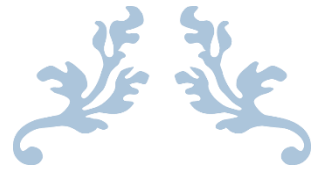


Figure III- 21: la courbe combinée (expérimentale et ABAQUS) dans la direction 90°



CHAPTER IV : **LOI DE HILL**



IV.1 Application des critères de l’anisotrope

Pour déterminer les grandeurs mécaniques de l’anisotropie nous présentant le résultat de l’essai de traction et du coefficient d’anisotrope pour les deux critères de Hill48. Les paramètres mécaniques ont été mesurés pour une pré-déformation de 30%.

Les deux tableaux (Tableau II-3 et Tableau II-5) présentent les données expérimentales des grandeurs mécaniques telles que les contraintes d’écoulement et les coefficients de Lankford suivant les sept directions (0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°) plus celles de de sollicitation équilibraxiale (σ_b, r_b) adoptée dans l’identification des coefficients d’anisotropie relatifs au critère et pour un comportement de plasticité associée.

IV.1.1 Résultats expérimentaux (ETRAG)

Tableau IV.1 : Les contraintes d’écoulement suivant chaque 15° de la direction de laminage

σ_0	σ_{15}	σ_{30}	σ_{45}	σ_{60}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b
206.36	208.36	211.86	214.83	205.00	203.00	203.13	204.7

Tableau IV.2 : Les valeurs des contraintes d’écoulements normalisées

σ_0/σ_0	σ_{15}/σ_0	σ_{30}/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{60}/σ_0	σ_{75}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_b/σ_0
1	1	1.02	1.041	0.99	0.983	0.98	0.9921

$$\sigma_b = (\sigma_0 + \sigma_{90})/2$$

IV.1.2 Résultats simulés (Abaqus)

Tableau IV.3: Les contraintes d’écoulement suivant chaque 15° de la direction de laminage

σ_0	σ_{15}	σ_{30}	σ_{45}	σ_{60}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b
237	244	244	249	242	235	242	239.5

Tableau IV.4: Les valeurs des contraintes d’écoulements normalisées

σ_0/σ_0	σ_{15}/σ_0	σ_{30}/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{60}/σ_0	σ_{75}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_b/σ_0
1	1.03	1.03	1.05	1.02	0.99	1.02	1.01

$$\sigma_b = (\sigma_0 + \sigma_{90})/2$$

IV.2 Coefficient de Lankford $r(\theta)$.

A partir des taux des déformations cités dans les formules ci-dessous en utilisant les rapports relatifs classiques des longueurs (l), les largeurs (b) et les épaisseurs (e) de l'éprouvette, le coefficient d'anisotropie ou de Lankford $r(\theta)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{l_f - l_0}{l_0} \\ \varepsilon_2 = \frac{b_f - b_0}{b_0} \\ \varepsilon_3 = \frac{e_f - e_0}{e_0} \\ r(\theta) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = -\frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \end{array} \right.$$

Tableau IV.5: Les différents résultats expérimentaux obtenus pour cette contribution.

	Les dimensions initiales et finales de l'éprouvette en (mm)							
Direction (°)	L ₀	b ₀	e ₀	L _f	b _f	$\varepsilon_{r1} = \ln(L_f / L_0)$	$\varepsilon_{r2} = \ln(b_f / b_0)$	r (°)
0	50	12.5	1.5	71.3	10.6	0.354	-0.164	0.86
15	50	12.5	1.5	71.0	10.7	0.350	-0.155	0.79
30	50	12.5	1.5	69.4	10.9	0.327	-0.137	0.72
45	50	12.5	1.5	68.7	11.1	0.317	-0.1187	0.60
60	50	12.5	1.5	71.0	11.0	0.350	-0.1278	0.575
75	50	12.5	1.5	71.5	10.8	0.357	-0.145	0.70
90	50	12.5	1.5	71.6	10.5	0.359	-0.174	0.94

Tableau IV.6: Les différents résultats obtenus par le logiciel Abaqus

Les dimensions initiales et finales de l'éprouvette en (mm)								
Direction (°)	L ₀	b ₀	e ₀	b _f	e _f	ε _{r2} =ln(b _f / b ₀)	ε _{r3} =ln(e _f / e ₀)	r (°)
0	50	12.5	1.5	9.16	1.055	-0.310	-0.352	0.88
15	50	12.5	1.5	9.27	1.11	-0.298	-0.301	0.99
30	50	12.5	1.5	9.22	1.10	-0.304	-0.301	1.01
45	50	12.5	1.5	9.54	1.085	-0.270	-0.323	0.835
60	50	12.5	1.5	9.41	1.06	-0.284	-0.347	0.818
75	50	12.5	1.5	9.11	1.093	-0.316	-0.316	1
90	50	12.5	1.5	9.37	1.076	-0.288	-0.332	0.867

IV.3 Formulation des lois de comportement

- Application du critère de Hill quadratique (1948) [15].

Le critère de Hill48 s'exprime dans le repère orthotrope sous la forme suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2$$

Si : σ_0^1 , σ_0^2 et σ_0^3 sont des contraintes d'écoulement en traction uniaxiale suivant les directions principales d'anisotropie, on voit que :

$$G + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^1)^2} \quad , \quad F + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^2)^2} \quad , \quad F + G = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^3)^2}$$

Si : σ_0^{23} , σ_0^{13} et σ_0^{12} sont des contraintes en cisaillement simples par rapport aux axes principaux plans d'anisotropie, on obtient :

$$2L = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{23})^2} \quad , \quad 2M = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{13})^2} \quad , \quad 2N = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{12})^2}$$

Selon l'hypothèse de contraintes planes, consistant à négliger toutes les composantes du tenseur des contraintes hors plan de la tôle ($\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$), ce critère peut se réduire à l'expression suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = (G + H) \sigma_{11}^2 - 2H \sigma_{11} \sigma_{22} + (H + F) \sigma_{22}^2 + 2N \sigma_{12}^2 = \sigma_0^2$$

Si l'on pose $F = G = H = 1/2$, $L = M = N = 3/2$, le critère de Hill se réduit au critère de Von Mises correspondant à un matériau incompressible isotrope.

Rappelons tout d'abord les relations classiques relatives à l'essai de traction uniaxiale sur une tôle orthotrope dont le comportement plastique est décrit par le critère de Hill quadratique et la loi d'écoulement associée par le principe de normalité :

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{(F \sin^4 \theta + G \cos^4 \theta + H \cos^2 2\theta + 2N \sin^2 \theta \cos^2 \theta)^{1/2}}$$

$$r(\theta) = \frac{H \cos^2 2\theta - (F + G - 2N) \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta}$$

Où $\sigma(\theta)$ et $R(\theta)$ désignent respectivement la contrainte de traction et le coefficient de Lankford et F, G, H, N les paramètres du critère de Hill

IV.4 Identification des paramètres d'anisotropie associés et non associés.

Nous choisissons une plage de déformation plastique homogène afin d'éviter la zone de striction. Les deux hypothèses de plasticité qui consistent au découplage total de tenseur de contrainte de celui de déformation.

Plasticité Associée AFR (Associated Flow Rule)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du mélange entre les contraintes d'écoulement et les coefficients de Lankford issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le biais de l'équation suivante

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2 (1 + r_{90})} \right), \quad G = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2 (1 + r_{90})} \right), \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2 (1 + r_{90})} \right),$$

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2 (r_{90} - 1)}{\sigma_{90}^2 (1 + r_{90})} \right)$$

Plasticité Non Associée non-AFR (Non Associated Flow Rule)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du découplage du tenseur des contraintes d'écoulement par rapport à celui des déformations (les coefficients de Lankford) issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s’obtiennent par le modèle d’identification suivant :

1- Soit à partir du tenseur de contraintes $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$ uniquement (non-AFR-s).

$$2F = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2G = 1 - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2H = 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2N = \frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}$$

2- Soit à partir des coefficients de Lankford r_0, r_{45}, r_{90} uniquement(non-AFR-r).

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, \quad G = \frac{1}{(1+r_0)}, \quad H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, \quad N = \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{2r_{90}(1+r_0)}$$

IV.5 Dépouillement des données

IV.5.1 Pour le critère quadratique de Hill48 :

Rappelons ici que seulement trois (3) grandeurs mécaniques expérimentales de contraintes d’écoulements et du coefficient d’anisotropie $\sigma(\theta)$ et $r(\theta)$ sont nécessaires aux identifications ultérieures :

Tableau IV.7 : Propriétés mécaniques de l’acier DC04 dans trois directions.

θ°	$\sigma_{e0.2}$ (MPa)	$r(\theta)$	σ_b (MPa)
0°	197.1	0.86	201.55
45°	207.8	0.60	
90°	206	0.94	

Notez que la limite d’écoulement équi-biaxiale σ_b calculer comme suit : $\sigma_b = (\sigma_0 + \sigma_{90}) / 2$

Tableau IV.8: Propriétés mécaniques de l’acier DC04 dans trois directions données par Abaqus.

θ°	$\sigma_{e0.2}$ (MPa)	$r(\theta)$	σ_b (MPa)
0°	237	0.88	239.5
45°	249	0.835	
90°	242	0.867	

Notez que la limite d’écoulement équi-biaxiale σ_b calculer comme suit : $\sigma_b = (\sigma_0 + \sigma_{90}) / 2$

Les contraintes d’écoulement normalisées par rapport à celle de la direction de laminage, pour les trois orientations expérimentales et simulées sont adressées respectivement dans le (Tableau II.8 et Tableau II.9).

Tableau IV.9: Grandeurs expérimentales normalisée

NormalizedStress	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_b/σ_0
	1	1.041	0.98	1.022
NormalizedLankford	r_0/r_0	r_{45}/r_0	r_{90}/r_0	r_b
	1	0.697	1.093	1

Le coefficient d’anisotropie equibiaxial r_b est supposé égale à l’unité ($r_b=1$).

Tableau IV.10: Grandeurs simulées normalisée.

NormalizedStress	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_b/σ_0
	1	1.05	1.021	1.01
NormalizedLankford	r_0/r_0	r_{45}/r_0	r_{90}/r_0	r_b
	1	0.948	0.985	1

Le coefficient d’anisotropie equibiaxial r_b est supposé égale à l’unité ($r_b=1$).

Les paramètres anisotropes de Hill 1948 (F, G, H et N) distribués dans le plan de la tôle ont été identifiés et présentés dans (Tableau II.10 et Tableau II.11) pour les deux démarches expérimentale et simulée et sous l’application des deux logiques de plasticité associée et non associée.

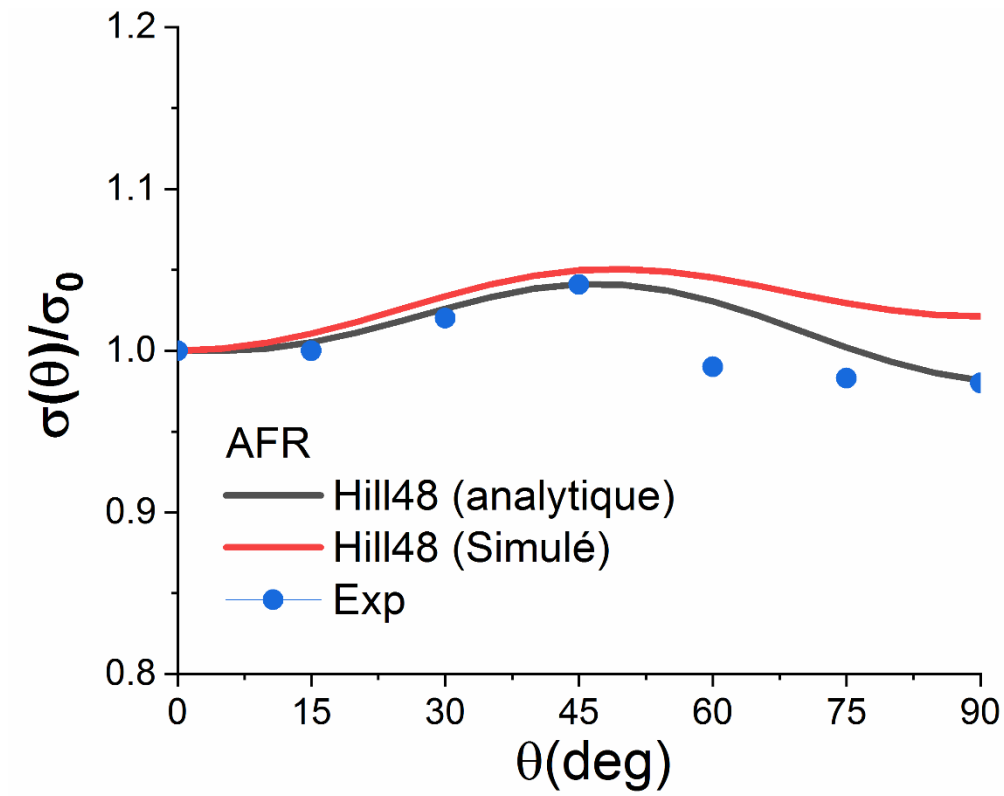
Tableau IV.11 : Paramètres d’anisotropie identifiés expérimentalement.

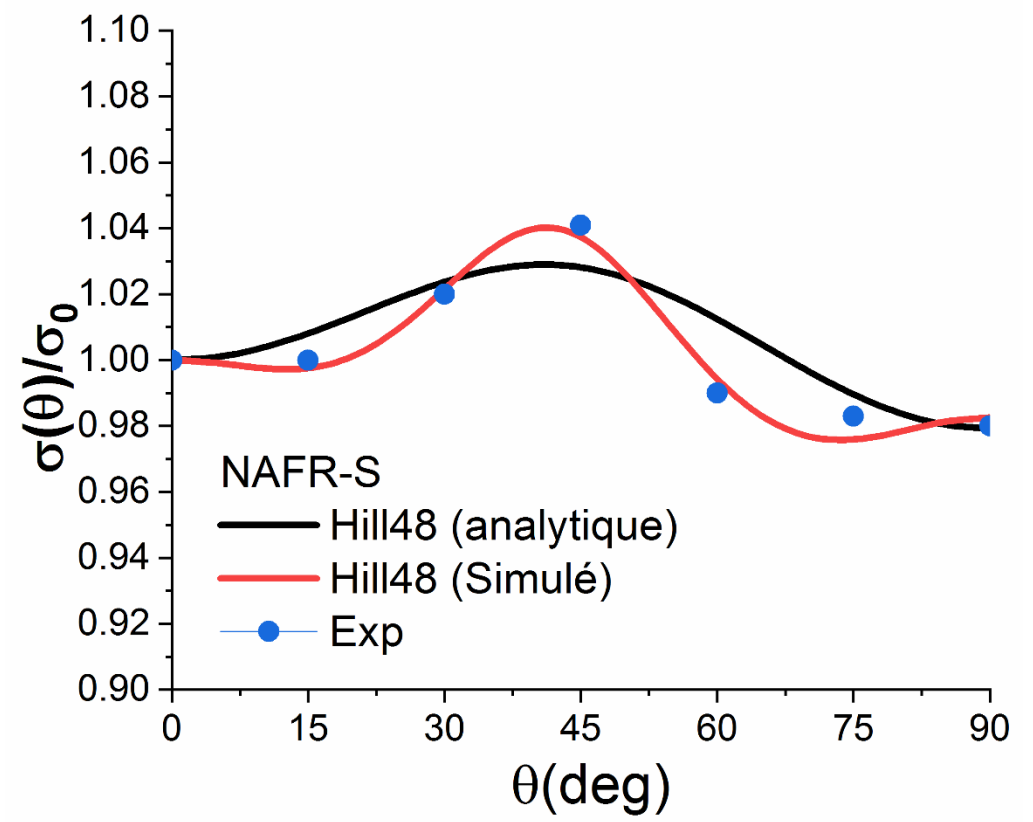
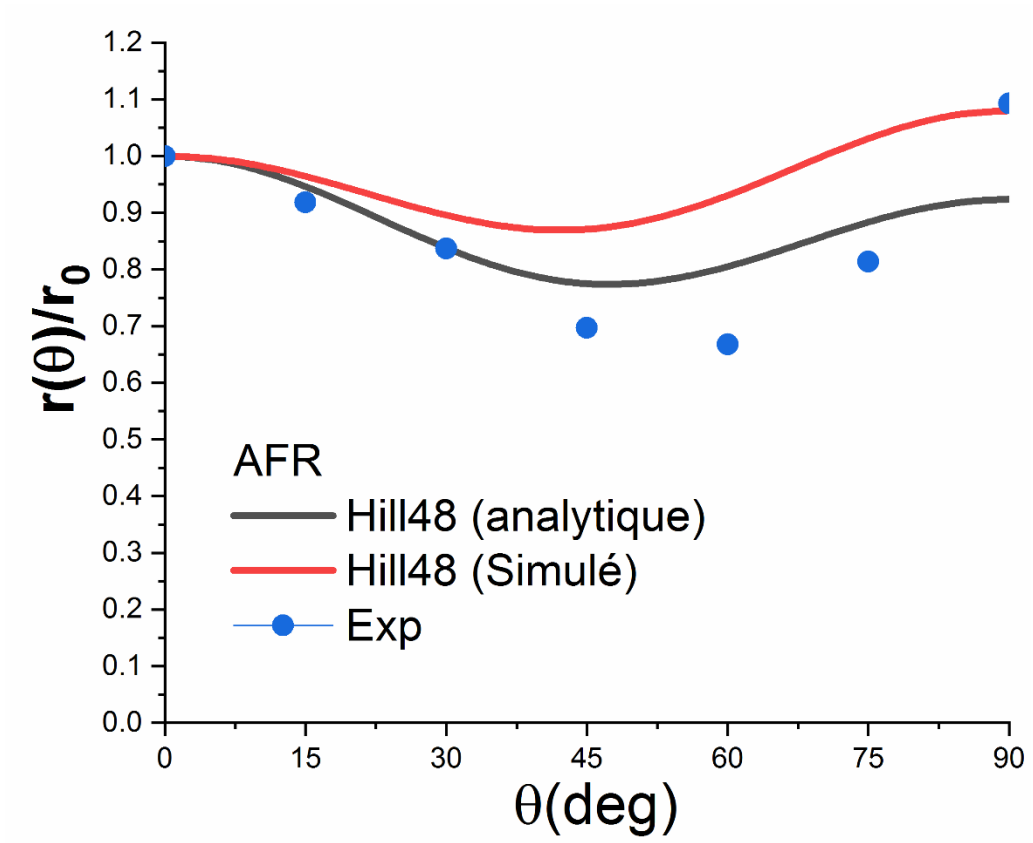
AFR	F	G	H	N
	0.536	0.495	0.504	1.329
NAFR-s	F	G	H	N
	0.528	0.487	0.512	1.337
NAFR-r	F	G	H	N
	0.491	0.537	0.462	1.132

Tableau IV.12. : Paramètres d’anisotropie identifiés par voie de simulation

AFR	F	G	H	N
	0.513	0.554	0.445	1.28
NAFR-s	F	G	H	N
	0.51	0.469	0.489	1.323
NAFR-r	F	G	H	N

0.539	0.531	0.468	1.43
-------	-------	-------	------





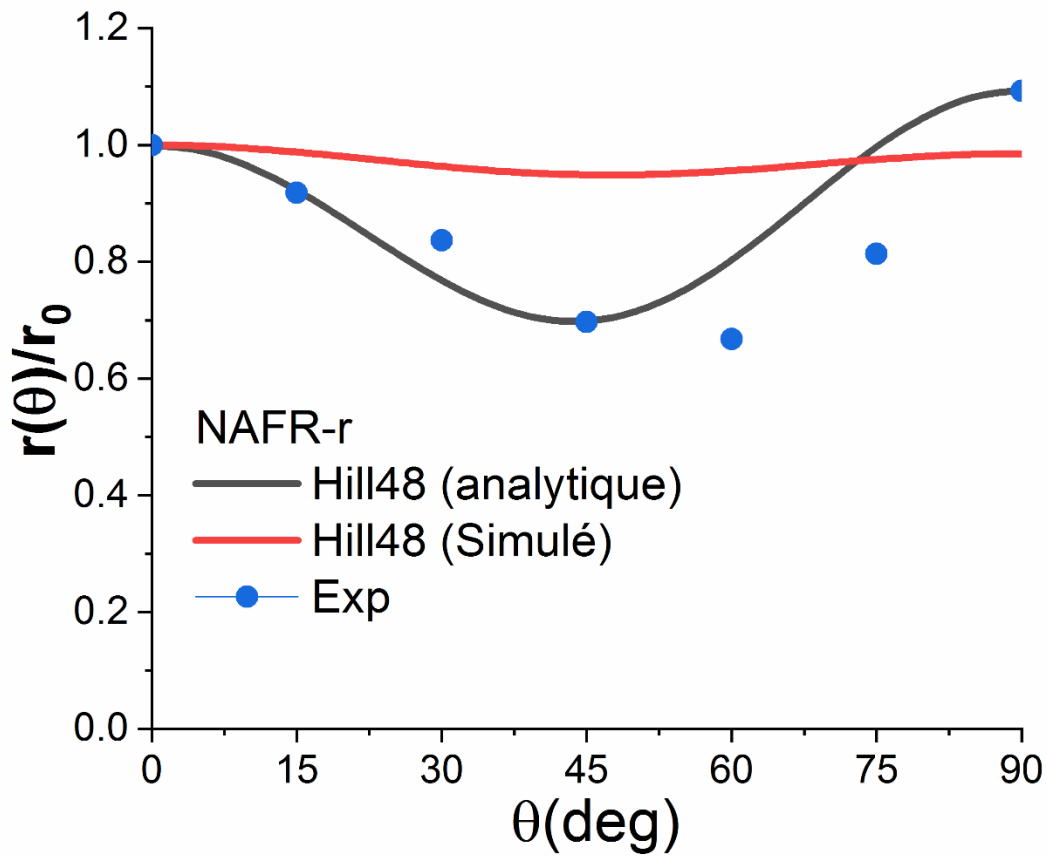


Figure IV-1 Résultats de modélisation de contrainte d'écoulement $\sigma(\theta)$ et $r(\theta)$ normalisée sous le cadre des 2 plasticités.

Nous constatons que les résultats de modélisation par le critère de Hill est plus proche aux prévisions données par le logiciel ABAQUS et ce, pour les deux grandeurs mécaniques pour un intervalle de déformation.



CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale :

La simulation par le biais d'un code de calcul par éléments finis comme Abaqus permet, entre autres, de réaliser des simulations du comportement de pièces ou de structures prenant en considération des non-linéarités, des grandes déformations, de paramétrer et prévoir plusieurs grandeurs. Afin de prévoir le comportement anisotrope de notre tôle laminée destinée à l'emboutissage, des échantillons coupés suivant des différentes directions faisant un angle de 15° par rapport à la direction de laminage ont été proposées pour être simulées et modélisées. Une comparaison avec les résultats de caractérisation expérimentale est aussi l'objet de cette étude. On peut montrer l'importance des points suivant :

- ✓ Une fluctuation harmonieuse est constatée entre l'expérimental et le simulé dans la variation de la courbe de contrainte d'écoulement suivant les 7 angles ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) pour une proportion de déformations allant jusqu'à 30%.
- ✓ Le logiciel permet de tirer les valeurs du coefficient d'anisotropie ce qui facilite de mieux orienter le sens de l'anisotropie afin d'améliorer l'emboutissabilité du produit fini.
- ✓ Généralement, Les résultats de modélisation par le critère de Hill est plus proche à l'expérimental qu'aux prévisions données par le logiciel Abaqus et ce, pour les deux grandeurs mécaniques.

Comme perspective à cette contribution, on propose de d'optimiser les paramètres mécaniques par les lois phénoménologiques par le code de calcul et par la modélisation et de prévoir les limites de formage de ces tôles destinées à l'emboutissage.

Références Bibliographiques

- [1] <http://www.verre-et-cristal.com/laminage.php>
- [2] <http://souspression.canalblog.com/archives/2011/01/21/19993827.html>
- [3] Jean-Yves Debost et Bernard Réal, Les rapports des industries de la manutention avec l'évolution des processus de production et des moyens de transport dans le cours de l'internationalisation du capital, Université des Sciences Sociales de Grenoble, Institut de Recherche Economique et de Planification, mars 1975
- [4] Eustace C. Larke, trad. Bernard Bonnefoy, Le Laminage des produits plats, Dunod, 1963.
- [5] Jacques Corbion (préf. Yvon Lamy), Le savoir fer — Glossaire du haut fourneau : Le langage (savoureux, parfois) des hommes du fer et de la zone fonte, du mineur au cokier d'hier et d'aujourd'hui, 5, 2003
- [6] FICHE 1. QU'EST CE QUE LE DECOUPAGE-EMBOUTISSAGE ?
<http://www.metiers-mecanique.com/ufimo/decoupage/impression.asp?fiche=8>
- [7] TAYLOR B., Sheet metal formability, AISI Committee of Sheet Steel Producers, American Iron and Steel Institute, Washington D.C., 1984
- [8] SWIFT H. W., Plastic instability under plane stress, J. Mech. Phys. Solids, vol 1, p 1-18, 1952
- [9] NAKAZIMA K., Study on the Formability of Sheet Steels. Yawata Tech. Rept., n°264, p 141. 1968
- [10] : Articles scientifiques et documentation technique dans tous les domaines.
<http://www.techniques de L'ingénieur.fr>
- [11] MARCINIAK Z., KUCZINSKI K. et POKORA T., Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension, Lot.J. Mech. Sci., vol 15, p 789- 805, 1973
- [12] KEELER S. P., Determination Of forming limits in automotive stampings, Sheet Metal Industries, vol 42, p 683-691. 1965
- [13] GOODWIN G. M., Application of the strain analysis to steel metal forming in press shop, La Metallurgia Italiana, n°8, p 767-772. 1968
- [14] MAKKOUK R. et FERRON G., Etude du comportement mécanique des aciers et alliages légers en vue de la caractérisation de leur emboutissabilité. Projet CEDRE, Rapport Scientifique., I.S.G.M.P. (L.P.M.M.) Université de Metz. Juin 2006.
- [14] R. Martin : « Mise en forme par déformation » : CETIM (Etablissement de Senlis). Octobre 2008.
- [15]: Hill, Rodney. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193: 281–297.