

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénierie

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : METALLURGIE

Thème

**Etude des tôles (XES) laminés à froid au niveau de LAF
destinées à l'emboutissage au niveau de Ferrovia**

Spécialité: Génie Métallurgique

PRESENTE PAR : BERROU BRAHIM

Dirigé par: Pr. ZAAF .M

Université d'Annaba

Jury de soutenance:

Président : Pr. MEBAREK .A
Examineurs : Dr. HACINI .M
Dr. DEKHIL .L

Université d'Annaba
Université d'Annaba
Université d'Annaba

Session Juin 2019

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à ma mère,

mes frères et

mes sœurs

A mon père source de courage et

volante qui m'a soutenu

tous le long de ma vie.

A ma famille la plus chère à ma vie.

Et tous mes collègues de ma promotion

surtout Guernoub.Y, Gani.A, Sid.A,

Laboubi.S, Mechouche.N, Bouzeraib.D ,

Ayris.H

Remerciements

Louange à Dieu, mon créateur, de m'avoir donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail, Puis Je voudrais témoigner toute ma gratitude à Monsieur ZAAF.M mon encadreur pour sa confiance, sa disponibilité et le grand intérêt qu'il a toujours manifesté pour ce travail, Sa rigueur Scientifique, ses encouragements et son soutien.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Messieurs MEBAREKA pour son aide ses encouragements et son soutien.

Je ne sais comment exprimer ma reconnaissance aux Messieurs ABKA.M, LAGRATTE.S SLIMANI.KH, GHANIA.W et Mme traiaia.n et pour ses encouragements, J'avoue que les résultats présents dans ce manuscrit n'auraient pu l'être sans son aide précieuse et sa contribution à l'enrichissement du présent travail.

Ce travail doit beaucoup aux personnes de l'équipe de LAF ET de laboratoire central de Sider El-Hadjar.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants de département de métallurgie et génie des matériaux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du Laboratoire du métallurgie et Génie Des matériaux pour leur sympathie et amitié qu'ils ont exprimé à mon égard.

Qu'il trouve dans ces quelques mots le témoignage de toute ma reconnaissance et gratitude

Merci 😊

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Présentation de l'emboutissage	
1- Généralités sur l'emboutissage	3
2- Modes de déformation en emboutissage	4
3- Influence des paramètres d'emboutissage sur l'amincissement du flan	5
3. a Influence de la structure des tôles minces sur leurs emboutissabilité :	5
3. c Influence de la texture cristallographique	6
3.d Influence du coefficient d'écrouissage :	6
3. e Influence du coefficient d'anisotropie :	7
4- L'opération d'emboutissage	7
5 -a L'emboutissage en température	9
5-b L'emboutissage à froid.....	9
6 -Sollicitations en emboutissage.....	10
7- Loi d'écrouissage:.....	12
8- Fonction seuil.....	13
9- Conclusion.....	14
Chapitre 02 : étude expérimental	
1 -Introduction	15
2 -Choix du matériau	15
3 -Paramètres géométriques de la tôle (Tandem).....	15
4 -Exigence de la norme NFEN10130	16
Composition chimique	16
Caractéristiques mécaniques.....	16
5 - Préparation Éprouvettes :	17
6-1. Eprouvettes non usinées	18
6-2. Éprouvette non proportionnelle	18
7-1. Analyse chimique.....	19

7-2. Analyse métallographique	19
7-2.1 Examens au microscope	19
8-Les essais mécaniques.....	20
8 -1Essai de dureté	20
8-2Essai de traction	21
9 -Identification de la loi de comportement.....	22
9-1 Cadre et formalisme général.....	22
10-Fonction seuil.....	23
11-Lois d'écrouissage.....	23
Modèle d'Hollomon :	23
Modèle de Ludwick :	24
Modèle de Swift :	24
12-Passage d'une courbe conventionnelle a une courbe rationnelle.....	24
13-Identification de la loi d'écrouissage	25
14-Méthode des moindres carrés	25
15-Préparation des échantillons :	26
16-Mesures effectués : Présenter toutes les mesures et les calculs effectués	28
17-Résultats expérimentaux.....	34
18-Résultats et analyse des investigations.....	40
18-1 Composition chimique	40
18-2 métallographique.....	40
19. Conclusion	44

Chapitre 03 : étude de l'emboutissage

1-Introduction	45
2-Critère de Considère :	45
3-Critère de Swift :	47
4-Modélisation simplifié de l'emboutissage au cas où $\alpha=1$ (Expansion équilibaxée)	61

4-1Cadre isotrope	61
4-2Cadre isotrope transverse	64
4-3Cadre orthotrope	68

Chapitre 04 : simulation numérique de l’emboutissage du bac de la brouette

1-Introduction	70
2-Détermination de la zone de rupture	71
2. a Simulation d’opération d’emboutissage	71
2.b Simulation de la striction	71
3-Influence de la force de serrage	73
4-La comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle analytique.....	76
5-Conclusion	76
Conclusion general.....	77

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure 1. Procédé d'emboutissage	3
Figure 2. Mode principal de déformation d'une pièce emboutie	4
Figure 5. Le processus d'emboutissage en quatre étapes [Arwidson 05].	8
Figure 6 : courbe de limite formage a la striction.	10
Figure 7.1: Courbe Limite de formage.....	11
Figure 7.2: Courbe Limite de formage.....	11
Figure 8 : Modèles d'écroutissage usuels.....	13

Chapitre II

Figure1 : courbe présente le taux de réduction et les déformation partiel en fonction de déformant cage.	16
Figure. 2: le microscope « Nikon»	20
Figure. 3: le microscope «Nikon».....	20
Figure. 4. :d'uromètre universel.	21
Figure. 5: Machine de traction « MTS »	22
Figure 6 : schéma présenté comment on a découpé les échantillons	27
Figure 7 : les démontions et les déformant parte de les éprouvettes de traction	27
Figure 8 : cadrage du éprouvette de traction	28
Figure 9 : photo éprouvette de traction rial préparé.....	28
Figure10 : Courbe rational de traction direction de laminage	29
Figure11 : Courbe rational de traction direction30°/ laminage	29
Figure12 : Courbe rational de traction direction45/ laminage.....	30
Figure13 : Courbe rational de traction direction60/ laminage.....	31
Figure14 : Courbe rational de traction direction transversal	31
Figure15 : Courbe rational de traction de toute direction en fonction de déformation vrai	31
Figure16 :0° ----1%	32
Figure17 :0° --- 1 20%	32

Figure 18 : Courbe présentée le coefficient d'anisotropie r_{0° de direction de laminage en fonction de déformation vrai	35
Figure 19 : Courbe présentée le coefficient d'anisotropie r_{30° de direction 30° /laminage en fonction de déformation vrai	35
Figure 20 : Courbe : présentée le coefficient d'anisotropie r_{45° de direction 45° /laminage en fonction de déformation vrai	36
Figure 21 : Courbe : présentée le coefficient d'anisotropie r_{60° de direction 60° /laminage en.....	37
fonction de déformation vrai	37
Figure 22 : Courbe : présentée coefficient d'anisotropie r_{90° de direction 90° /laminage en	37
fonction de déformation vrai	37
Figure 23 : Courbe de l'évolution de la σ_0 en fonction de la direction / laminage.....	38
Figure 24 Courbe présentée	39
Figure25:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 100X.	41
Figure26:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 200X.	41
Figure 27 :Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 500X.	42
Figure28:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 1000X.	42

Chapitre III

Figure 1: Schéma représentant le modèle d'instabilité de Swift, relatif à une tôle plane soumise à un essai de bi-étirage	47
Figure 2 : Courbe limite de formage à la striction dans le plan $(\epsilon_{11}, \epsilon_{22})$, déterminée	49
Figure 3 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	52
Figure 4 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	52
Figure 5 : Epaisseur de début de striction	53
Figure 6 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport.....	53

Figure 7 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	54
Figure 8 : Epaisseur de début de striction	54
Figure 9 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	55
Figure 10 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	55
Figure 11 : Epaisseur de début de striction	56
Figure 12 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	56
Figure 13 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	57
Figure 14 : Epaisseur de début de striction	57
Figure 15 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	58
Figure 16 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	58
Figure 17 : Epaisseur de début de striction	59
Figure18 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	59
Figure 19 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	60
Figure 20 : Epaisseur de début de striction	60
Figure 21 : évolution de la contrainte équivalent en fonction de l'épaisseur	63
Figure 22 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur	66
Figure 23 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs (r=0.8).....	67
Figure 24 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs (r=1.2).....	68
Figure 25 : Comparaison d'évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs (r=0.8 ; r=1.2)	68

Chapitre IV

Figure1 : la forme et les Composants de presse d'emboutissage.....	72
Figure2 :comment se passe d'opération d'emboutissage	73
Figure 3: Simulation de la striction avec les valeurs $\varepsilon_{\text{équivalent}}$	74
Figure 4: Simulation de la striction avec les valeurs $\bar{\sigma}$	74
Figure 5: Simulation de la striction avec les valeurs σ_{11}	74
Figure 6: Simulation de la striction avec les valeurs σ_{22}	75
Figure 7: Simulation sans striction avec les valeurs $\varepsilon_{\text{équivalent}}$	76
Figure 8: Simulation sans striction avec les valeurs $\bar{\sigma}$	76
Figure 9: Simulation sans striction avec les valeurs σ_{11}	77
Figure 10: Simulation de la striction avec les valeurs σ_{22}	77
Figure 11: La comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle analytique	78

Liste du tableaux :

Tableau 1: Désignation de la nuance selon différents normes	15
Tableau. 2: Les paramètres géométriques de laminage à froid.	15
Tableau. 3: l'augmentation de limite d'écoulement par apporte les cinq cage	16
Tableau.4. : Exigence de la norme NFEN10130 de composition chimique	16
Tableau. 5. : propriétés mécaniques exigées par la norme NF EN 10130	17
Tableau 6 : Dimensions des éprouvettes	18
Tableau 7 : Tolérances sur largeur de l'éprouvette.....	19
Tableau 8 : démontions des échantillons et leur destination	26
Tableau 9 : Les résultantes de mesure de largeur après chaque 5% de déformation	33
Tableau 10 : Les résultantes de mesure épaisseur après chaque 5% de déformation	34
Tableau11 : présenté le coefficient d'anisotropie r_{0° de direction de laminage	35
Tableau 12 : présenté coefficient d'anisotropie r_{30° de direction 30°	35
Tableau13 : présenté coefficient d'anisotropie r_{45° de direction 45°	36
Tableau14 : présenté coefficient d'anisotropie r_{60° de direction 60°	37
Tableau 15 : présenté coefficient d'anisotropie r_{90° de direction 90° /laminage en fonction de déformation vrai	38
Tableau 16: présenté l'évolution de la σ_0 en fonction de la direction / laminage	38
Tableau17 : présenté l'évolution de l'anisotropie en fonction de la direction	39
Tableau18 : présenté A et n en fonction de la direction.....	39
Tableau. 19: Composition chimique.....	40
Tableau. 20: résultat de l'essai de la dureté.....	43

Introduction Générale

L'emboutissage est un procédé très répandu dans différents domaines de l'industrie, de l'agro-alimentaire à l'aéronautique en passant par l'automobile. Durant chaque opération de mise en forme, deux problèmes sont rencontrés, un épaississement due à des contraintes de compressions et un amincissement excessif dû à la mise en jeu de contraintes de traction intenses. Cet amincissement peut conduire à un déchirement prématuré de la tôle lors de sa mise en forme. A cet effet, réussir une opération d'emboutissage consistera à trouver le meilleur compromis possible entre ces deux effets.

Les scientifiques et les industriels cherchent donc toujours les meilleures conditions pour lesquelles ce compromis se réalise afin de minimiser les rebuts et obtenir un bon rapport qualité-prix indispensable au développement de cette activité industrielle.

Durant le stage pratique réalisé à Ferrovia, il a été constaté que la brouette (figure 01) fabriquée dans cette entreprise avait une masse importante, ce qui rendait sa vente de plus en plus difficile face à la concurrence des brouettes importés. Ayant une masse moins importantes, les brouettes importées rendaient invendables celles fabriquées à Ferrovia. L'objet de ce travail consiste à étudier la possibilité de fabriquer une brouette de masse plus faible, et donc susceptibles d'intéresser mieux les consommateurs. Pour cela, il fallait diminuer la masse du bac qui est la pièce la plus importante de la brouette. Cette pièce est obtenue par emboutissage. La diminution de la masse de cette pièce exige une diminution de son épaisseur. Différentes tentatives non fructueuses ont été réalisées pour cela. Cela est dû à un amincissement excessif qui induit une rupture de la tôle au cours de l'emboutissage. L'objectif de ce travail est d'outiller les industriels sur place à réussir leurs opérations d'emboutissage sans incidents de ruptures.

Pour cela il est nécessaire

- 1- Identifier la loi de comportement du matériau utilisé pour obtenir le bac.
- 2- Mettre au point une modélisation et simulation du procédé afin d'optimiser les paramètres d'emboutissage et réussir cette opération
- 3- Valider les résultats donnés par la modélisation et la simulation numérique par une simulation expérimentale réalisée sur site.

Ce mémoire est donc divisé en quatre parties. La première est bibliographique. Elle doit permettre de maîtriser l'emboutissage et les outils théoriques et pratiques utilisés dans ce travail.

Introduction Générale

La seconde est consacrée à l'identification de la loi de comportement suite à l'exploitation de données expérimentales obtenues après un nombre importants d'essais de tractions simples.

La troisième consiste à étudier l'emboutissabilité de la tôle XES fabriqué à El-Hadjar par une approche analytique qui s'appuie sur les critères de Swift et de Considère.

Le quatrième chapitre par une simulation numérique sous Abaqus de l'emboutissage du bac de la brouette.

Cette étude est finalisée par quelques conclusions et recommandations.

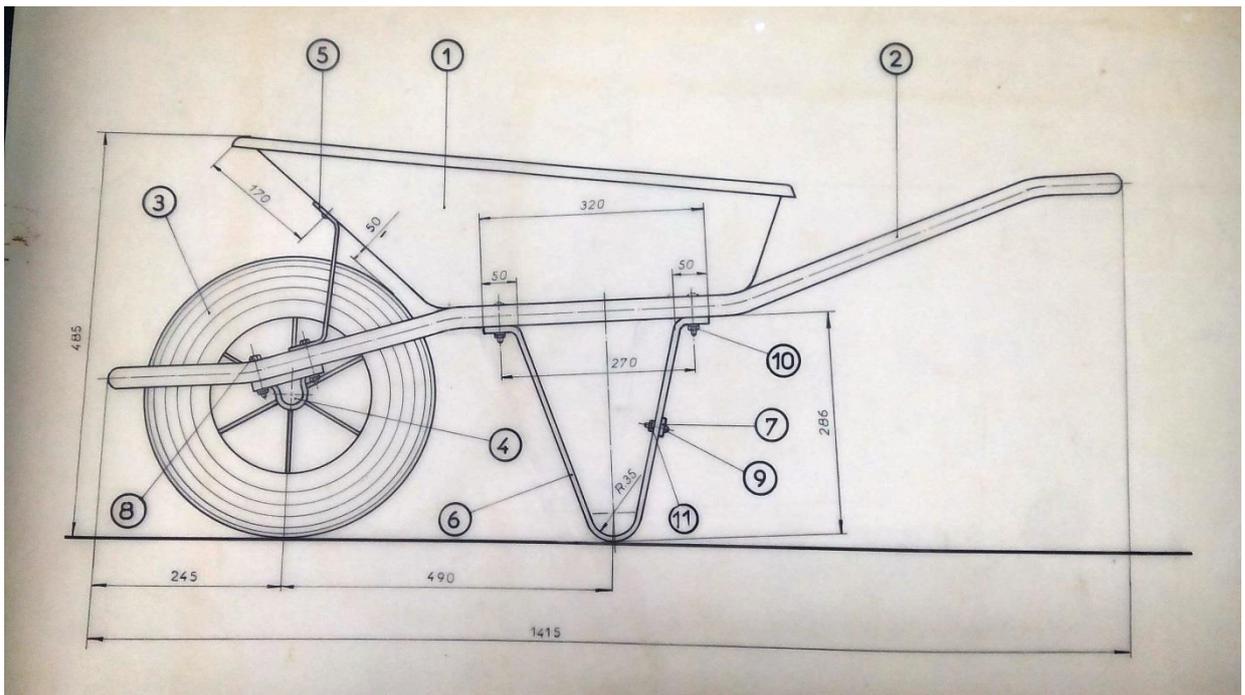


Figure01 : Dessin d'ensemble de la brouette

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| 1- Bac | 2- Brancard |
| 3- Roue | 4- Palier de brouette |
| 5- Renfort | 6- Pied |
| 7- Traverse | 8- Vis M8*50 |
| 9- Vis M8*25 | 10- Erou M8 |
| 11- Rondelle M8 | |

Chapitre I :
présentation de
l'emboutissage

Présentation de l'emboutissage

1- Généralités sur l'emboutissage

Par le passé, emboutir consistait à travailler une plaque de métal au marteau et sur une enclume, de manière à la rendre concave d'un côté et convexe de l'autre »[Littré]. Par cette définition, nous sommes à même d'imaginer qu'il y a fort longtemps que l'on emboutit des tôles. Les temps modernes, nés de la société de consommation, ont mené aux développements de l'automobile, de l'aéronautique, de l'industrie agro-alimentaire et à l'équipement des foyers entre autres. Par là même, le marteau est devenu poinçon, l'enclume, matrice et, les pinces et étriers servant à maintenir la tôle, serre-flan.[1]

La machine à emboutir est constituée de trois éléments principaux : un poinçon, une matrice et un serre flan. Le poinçon délimite le contour intérieur et applique la force nécessaire à la mise en forme de la tôle: force d'emboutissage. Quant à la matrice, elle délimite le contour extérieur de la pièce. Le serre flan permet, en pressant la tôle contre la matrice, de contrôler l'écoulement du métal le long du poinçon et d'éviter le phénomène du plissement (figure I) On distingue en emboutissage :

- Les outils rigides : poinçon, matrice, serre flan
- La pièce : feuille métallique déformable (ou flan). [2]

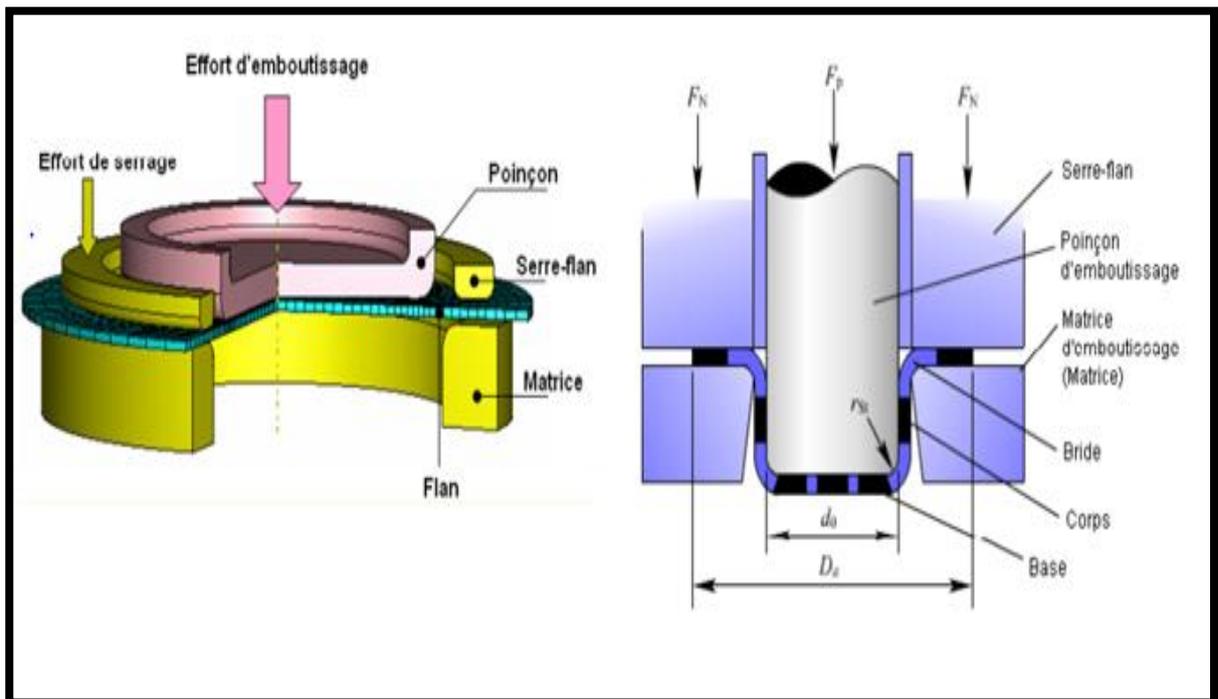


Figure 1. Procédé d'emboutissage [2]

2- Modes de déformation en emboutissage

La complexité de l'emboutissage est due à la diversité des sollicitations mises en jeu (figure 2). Les deux types de sollicitations essentiels sont données le *retrait* et l'*expansion*. L'*expansion* se caractérise par une augmentation de la surface de la tôle et donc par une réduction d'épaisseur, qui à l'extrême entraîne une rupture du métal. On observe ce mode de déformation sur le «nez de poinçon». Dans ce cas, les contraintes sont essentiellement de traction.

Le *retrait* a pour origine une contrainte de compression dans la tôle, qui peut donner lieu à une augmentation d'épaisseur du métal ou à la formation de plis. L'art d'emboutissage est de réaliser le meilleur compromis entre ces deux modes de déformation.

L'épaisseur de la pièce finie est variable : sous poinçon on peut constater un *amincissement de 10 à 25%*, et sous serre flan un *épaississement de 15 à 25%*.

Une pièce industrielle est considérée comme réussie si : $-20\% < \Delta h/h_0 < +15\%$
La valeur d'amincissement dépend de plusieurs tel que le rayon du congé, le jeu entre outils, l'effort de serrage, le frottement, la vitesse de déplacement du poinçon, la structure des tôles minces, le coefficient d'écrouissage, le coefficient d'anisotropie et particulièrement de la faculté de la tôle à s'emboutir sans endommagement, appelé emboutissabilité. [2]

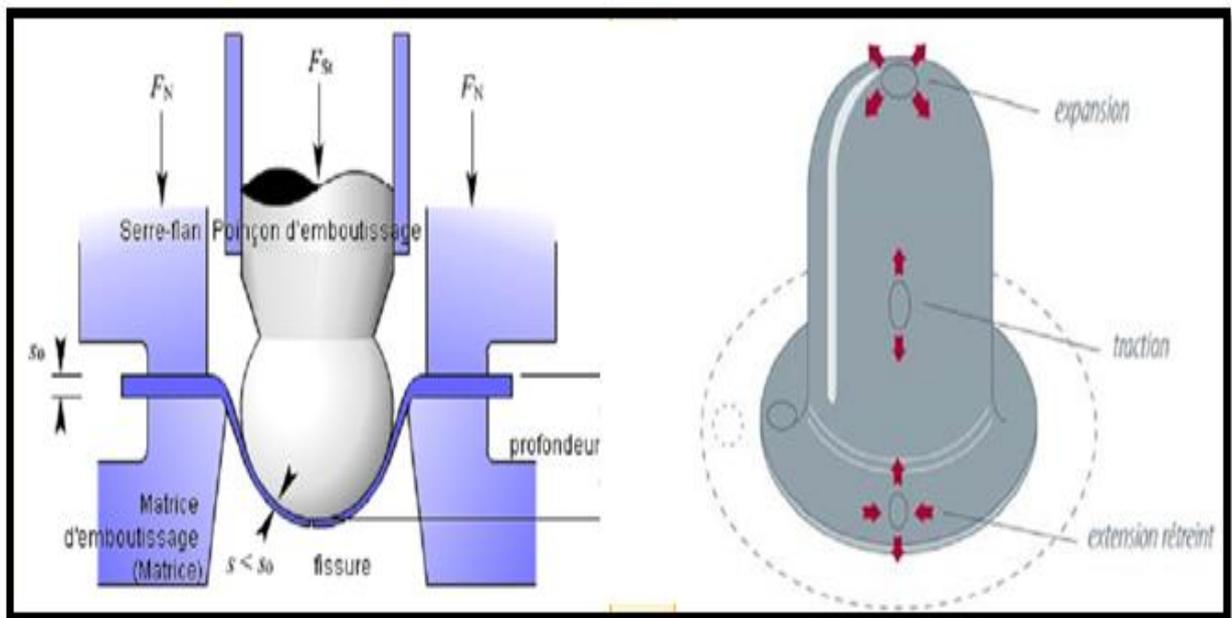


Figure 2. Mode principal de déformation d'une pièce emboutie [2]

Dans ce qui suit, un résumé de l'influence des facteurs précités est présentée brièvement.

3- Influence des paramètres d'emboutissage sur l'amincissement du flan

3. a Influence de la structure des tôles minces sur leurs emboutissabilité :

Les tôles minces ont pour principales caractéristiques d'être des agrégats poly-cristallins. Les propriétés mécaniques et donc l'emboutissabilité des tôles dépendent pour une grande part des caractéristiques de ces agrégats (taille des grains, texture cristallographique), elles dépendent aussi des particules de seconde phase et des teneurs des éléments en solution. [1]

3. b Influence de la taille des grains

La limite d'élasticité d'un métal poly-cristallin est donnée par la relation de Hall-Petch :

$$\sigma_e = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

Où d est le diamètre moyen des grains, σ_0 est la limite d'élasticité du monocristal et K un coefficient dépendant du matériau et de la température. L'augmentation de la taille des grains améliore l'emboutissabilité des tôles minces, mais il faut cependant savoir que cette augmentation de la taille des grains n'est pas limitée. Des grains trop gros entraînent l'apparition de nombreux défauts de surface lors de l'emboutissage tels que peau d'orange .

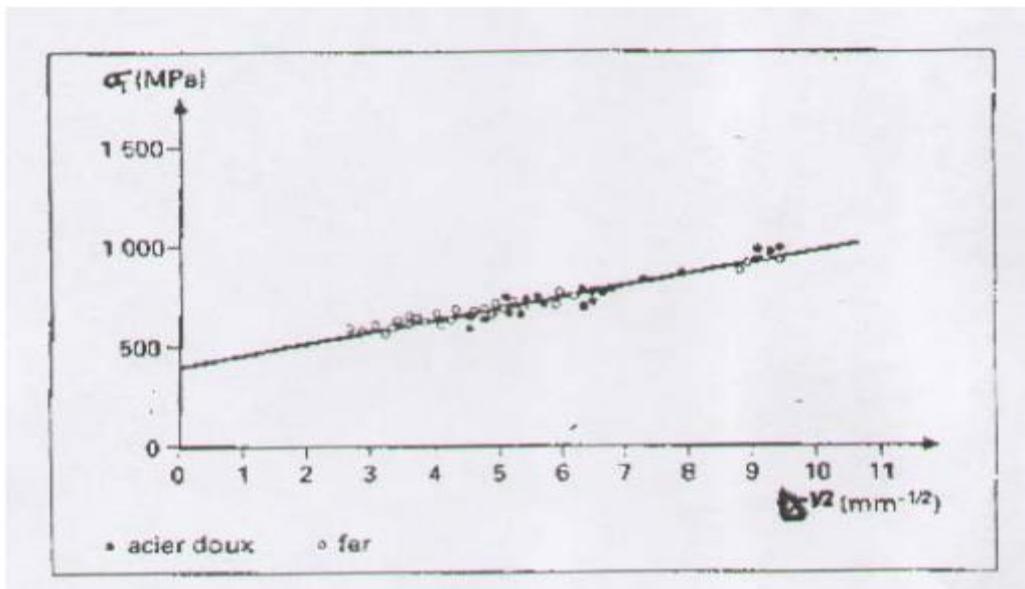


Figure 3. Variations de la limite inférieure d'un acier doux en fonction de la taille du grain.[4]

3. c Influence de la texture cristallographique

Lorsqu'un métal subit des déformations importantes, ces dernières donnent lieu à une orientation cristallographique préférentielle des grains. Cette orientation régulière des cristaux provoquée par les efforts extérieurs est appelée 'texture de déformation'. On sait que le phénomène de glissement ne se fait que lorsque la déformation est importante, la forme des grains change. Avant la déformation, les grains ont une forme grossièrement arrondie (Figure.I-16), par contre après la déformation, les grains s'étendent dans le sens des efforts appliqués en produisant une structure fibreuse.

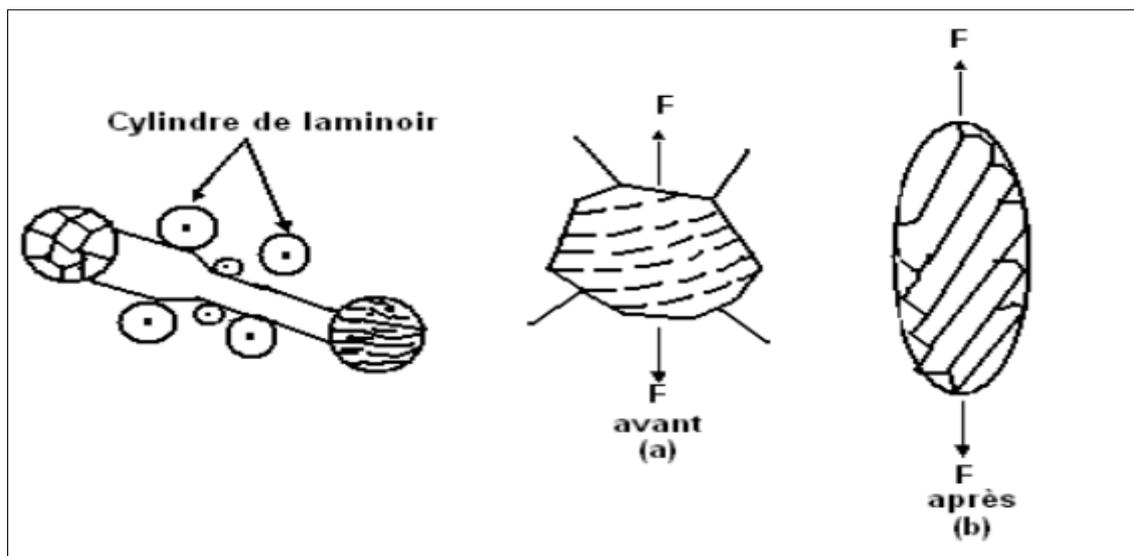


Figure 4 : Texture de déformation. [4]

Il faut tenir compte du fait que l'orientation des grains d'un métal n'est pas la même, et que la déformation plastique ne se produit pas dans le volume entier, plus la déformation est grande, plus le nombre de grains à orientation préférentielle est grand. Le caractère de la texture dépend de la nature du métal et du mode de déformation (laminage, étirage, etc....). [4]

3.d Influence du coefficient d'écroutissage :

Le coefficient d'écroutissage n donne une représentation de capacité de consolidation du métal en traction. Cette consolidation joue un double rôle : elle augmente le niveau de déformation que peut supporter le métal d'une part et elle permet surtout une meilleure répartition des déformations d'autre part. [4]

3. e Influence du coefficient d'anisotropie :

Un matériau à r élevé apparaît donc comme parfaitement adapté à la réalisation des pièces profondes en rétreint, c.-à-d. essentiellement des godets cylindriques (boîtes de conserves,

boites de boissons, filtres à huiles d'automobiles et camions, corps d'extincteurs) puisque sa facilité à se rétreindre va réduire les efforts de traction et les risques de rupture. Le raisonnement simple est la suivant: un coefficient d'anisotropie élevé dénote la facilité avec laquelle un métal peut s'écouler sous l'action d'une traction ainsi que le fait que son épaisseur variera peu. Or, le métal de la collerette, soumis à une tension radiale, doit justement se rétrécir circonférentiellement ; il le fera docilement de plus, ce métal s'amincira moins sur le rayon de poinçon, donc induira un moindre affaiblissement de cette zone chargée de « tirer » le métal de la collerette. Enfin, le moindre épaissement du métal dans les angles (pièces rectangulaires) y évitera le transfert de la charge du serre - flan. Tout concourt donc à favoriser le rétreint ; Notons qu'un raisonnement plus physique basé sur l'interprétation du critère de plasticité de Hill conduit aux mêmes conclusions. Ceci est vrai pour les valeurs de r élevées (1.5 et plus, cas des aciers doux pour emboutissage), mais pas pour les matériaux dont r proche ou inférieur à 1 (alliages aluminium, aciers à haute limite d'élasticité).

C'est alors plutôt le coefficient d'écrouissage qui importe car la répartition des déformations, particulièrement dans la zone de rupture sur le nez de poinçon. Si l'on considère les déformations, un coefficient r élevé a aussi pour effet d'incliner les trajectoires de déformations vers la gauche ceci est favorable. [5]

4- L'opération d'emboutissage

Les déformations engendrées par l'emboutissage conduisent en général à des modifications de l'épaisseur du flan, le volume total restant néanmoins constant. Du point de vue géométrique, l'emboutissage transforme donc une surface plane ou préformée (mais développable) en une surface non développable. Quatre étapes apparaissent au cours de l'opération d'emboutissage:

- Le positionnement du flan sur la matrice et les phénomènes de gravité qui peuvent en dérouler,
- Le serrage du flan par serre- flan,
- L'emboutissage proprement dit obtenu par descente du poinçon,
- L'ouverture de la presse et l'éjection de l'embouti. . [6]

L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse notamment sur les pièces d'aspect complexe. Le processus d'emboutissage est comme suit :

1-Une coupe à travers l'installation d'outil montre le poinçon, la matrice et le feuillard (ou l'objet) sur la reliure. La reliure est en position élevée.

2-La reliure et le poinçon sont descendus. La reliure atteinte la feuille en avant du poinçon et de ce fait une pression, la force de reliure, est appliquée sur la feuille. Par conséquent les parties périphériques de l'objet sont gardées en place. Si la reliure n'est pas plate une première formation a lieu.

3-Le poinçon est maintenant en contact avec la feuille et la feuille est dessinée par l'ouverture dans la matrice. Elle glisse au-dessus du rayon de matrice. Pendant que le poinçon procède en bas le rayon externe de l'objet circulaire est réduit. Dans ce processus l'objet est formé par l'étirage dans la direction de déformation, accompagné par compression et l'aplatissement dans la circulaire direction

4-Le poinçon s'écarte vers le haut et le composant formé est éliminé de l'outil.[7]

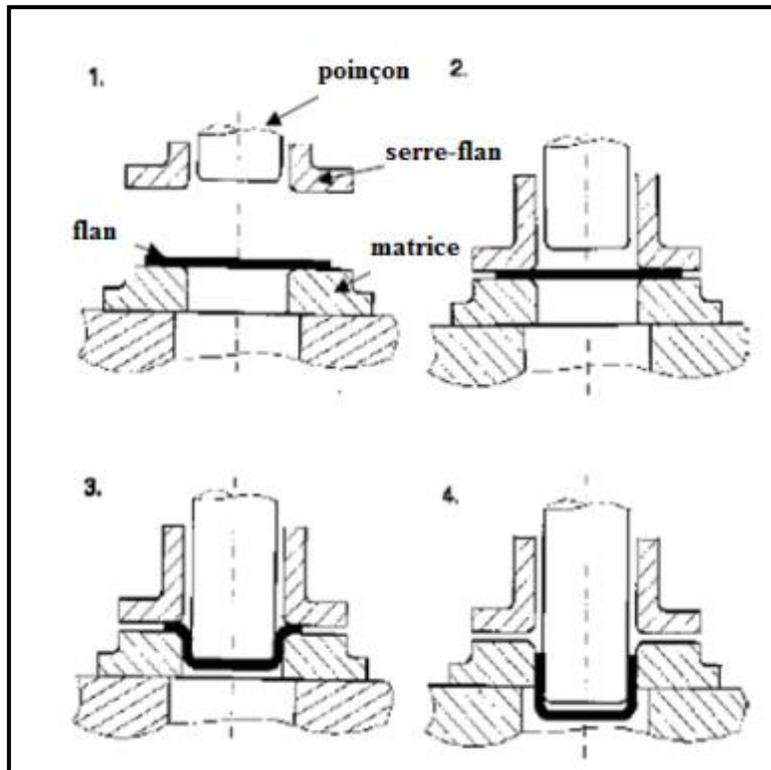


Figure 5. Le processus d'emboutissage en quatre étapes [7].

Selon la profondeur ou la forme de la pièce, plusieurs passes dans des outils différents peuvent être nécessaires.

L'emboutissage peut aussi être pratiqué par d'autres procédés, comme l'application d'un fluide à haute pression (hydroformage) qui plaque la tôle contre la matrice. Cette haute pression peut être obtenue à l'aide de dispositifs hydrauliques.

Sur certaines presses, la matrice peut se déplacer (emboutissage simple effet). De même une matrice fixe peut comporter des parties mobiles (triple effet etc...). [8]

Le choix du procédé dépend du type de presse disponible en atelier (effort de serrage, dimension), de la forme de la pièce, du matériau (acier standard, acier à haute résistance, aluminium etc...), du nombre d'opération total pour obtenir la pièce finale etc...

La formabilité de l'acier est améliorée en le chauffant légèrement, attention il ne faut pas modifier la phase (état atomique) sinon les propriétés mécaniques sont modifiées (résistance, dureté etc...) Mais en général, l'emboutissage est une opération de formage à froid, la matrice étant généralement refroidie pour limiter l'échauffement lié au contact. L'emboutissage ne plastifie pas entièrement la pièce, une étude de retour élastique est nécessaire pour assurer l'assemblage final. [8]

Dans l'emboutissage, la qualité de la partie formée est affectée par la quantité de métal formé dans la cavité de matrice. Une fois choisi correctement, ce profil de la force de serrage BHF peut éliminer des rides et retarde la rupture dans la partie tirée.

Le procédé d'emboutissage est important dans les divers secteurs industriels : transport, carrosserie automobile , appareils électroménagers, emballages métalliques, etc.

Un des intérêts principaux expliquant le succès de ce procédé réside dans la variété des composants réalisables et la cadence de production élevée. [9]

5 - L'emboutissage en température

Il existe deux techniques d'emboutissage: [2]

a) L'emboutissage à froid

- + Former une pièce à température ambiante.
- + Meilleure précision dimensionnelle limite les coûts évite la formation d'oxyde
- + Convient pour de faibles épaisseurs de tôles.
- Pour les pièces épaisses ==> emboutissage en plusieurs passes.
- + Effet de l'écrouissage lors de la mise en forme durcissement structural
- Contraintes résiduelles dans la pièce finie, limite des applications (rupture fatigue).

b) L'emboutissage à chaud

- Former une pièce par chauffage du flan (et de la matrice).
- + Permet d'emboutir des pièces profondes
- + Evite l'écrouissage et la formation de contraintes résiduelles
- Cadences de production moins élevées qu'en emboutissage à froid (inertie de chauffage).
- Pièces finies de moins bonne qualité. [2]

6 -Sollicitations en emboutissage

Au cours de l'emboutissage, différents modes des sollicitations peuvent apparaître. Elles peuvent différer fortement d'un mode à un autre, ces différents modes sont : L'expansion biaxiale, la traction uniaxiale, le Cisaillement pur, la Compression uniaxiale et le rétreint.

Les modes les plus importants sont l'expansion biaxiale et le rétreint. Sous l'effet des contraintes planes de traction, le premier peut conduire à un amincissement excessif du flan et éventuellement à sa rupture. Le second est le rétreint qui peut conduire à des ondulations désignés sous le nom "plis". Ils résultent de contraintes de compressions importantes. L'art d'emboutir consiste à trouver le bon compromis entre ces deux modes de sollicitations. Pour prédire le comportement d'un matériau à l'emboutissage, habituellement on met au point une courbe limite de formage. Elle se présente sous forme de diagramme des déformations principales comme présenté ci-dessous dans la figure 6. [2]

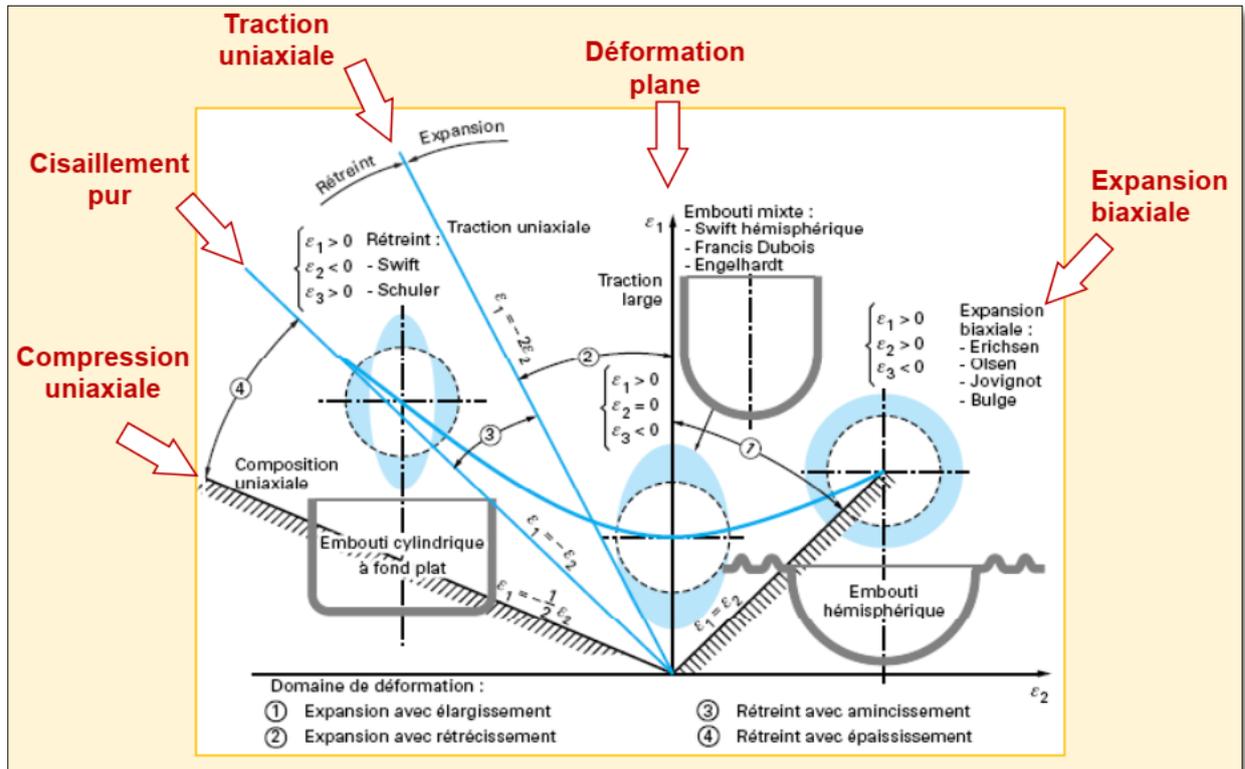


Figure 6 : courbe de limite formage a la striction.

Afin d'observer les déformations pendant l'emboutissage, on utilise les déformations principales, longitudinale ε_1 et transversale ε_2 .

Les courbes limites de formage (CLF) présentés dans la figure 7 représentant le lieu géométrique des déformations principales ε_1 et ε_2 provoquant la déchirure, elles sont obtenues à l'aide d'essais (Erichsen, Bulge, Swift,...). On définit 4 zones: Rupture, Striction, Validité, Plissement.

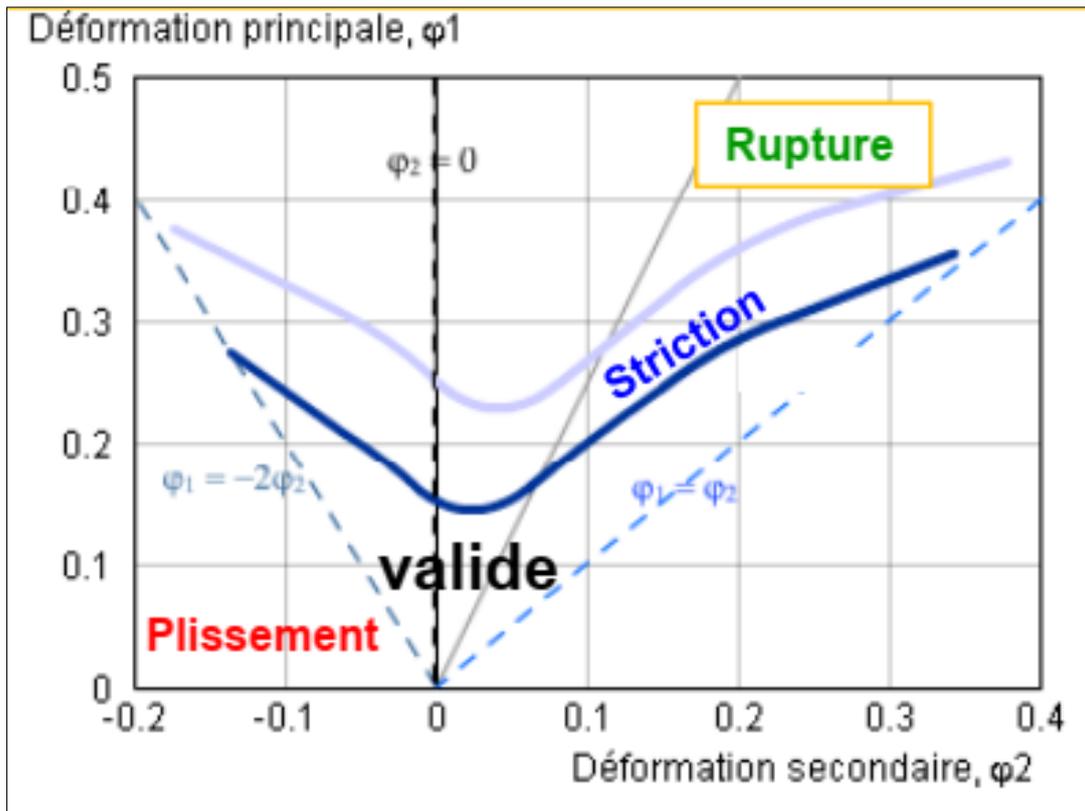


Figure 7.1: Courbe Limite de formage[2]

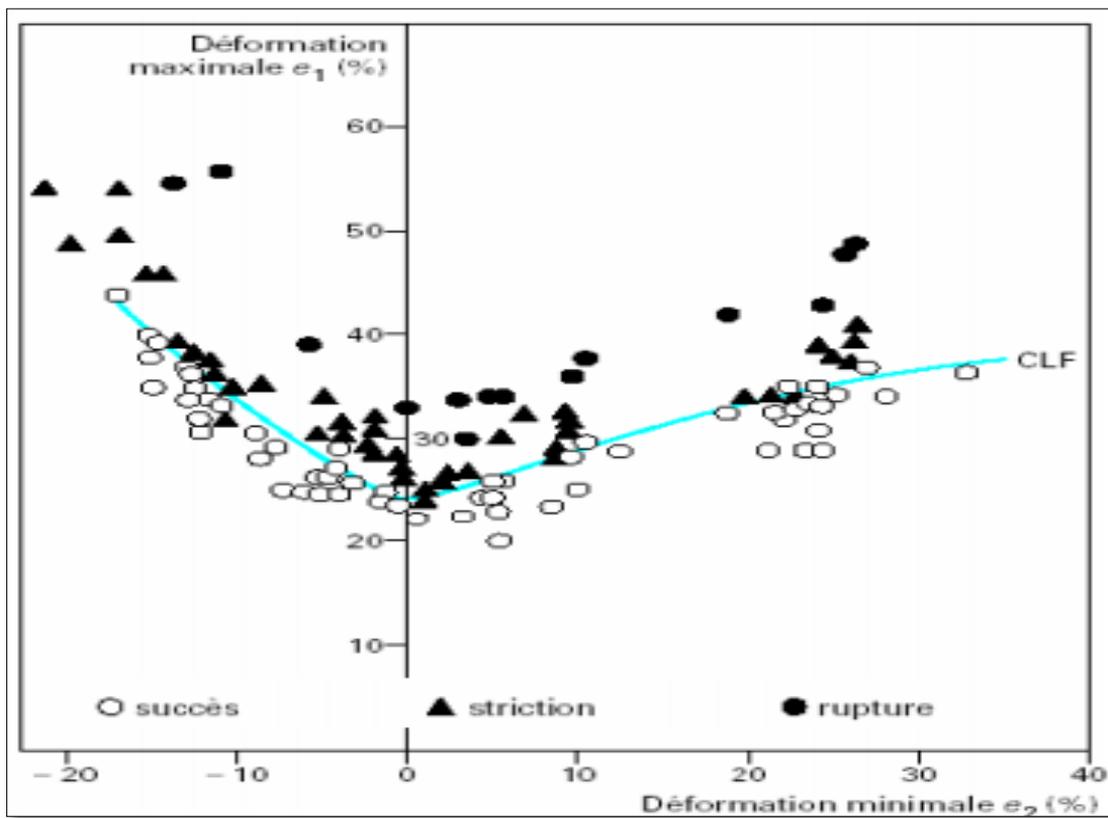


Figure 7.2: Courbe Limite de formage[10]

La mise au point de courbes limite de formage exige la connaissance de la loi de comportement du flan. L'emboutissage à froid donne un comportement élasto-plastique, L'identification de sa loi de comportement exige donc la connaissance des caractéristiques élastiques, de la fonction seuil (plasticité) et de la loi d'érouissage. Dans ce qui suit, les lois d'érouissage usuel et les formulations des lois de comportement sont présentés.

7- Loi d'érouissage:

En général, des essais de traction uniaxiale permettent l'identification des lois d'érouissage. On utilise le courbe contrainte déformation obtenues lors de ces essais. Il existe plusieurs modèles habituellement usités, il est proposé de les présenter dans ce qui suit.

1) Loi de puissance

Cette loi est appelé aussi loi d'Hollomon

$$\sigma_0 = A\bar{\epsilon}^n$$

A est un coefficient égal à la contrainte d'écoulement pour une déformation égale à un.

n est appelé usuellement coefficient d'érouissage ou exposant d'érouissage, il représente la faculté d'un matériau à se déformer plastiquement avant d'entamer la striction.

2) Loi de puissance avec déformation initiale

Cette loi est aussi appelé loi de Swift

$$\sigma_0 = A(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$$

3) Loi de Ludwick

$$\sigma_0 = \sigma_e + A\bar{\epsilon}^n$$

σ_e Correspond à la contrainte exercée pour entamer la déformation plastique, elle est en générale égale à la contrainte conventionnelle, c'est-à-dire la contrainte donnée à 0,2% de déformation.

4) Loi avec érouissage linéaire

$$\sigma_0 = Y + P\bar{\epsilon}$$

Il est à noter que ce modèle n'est plus utilisé aujourd'hui.

5) Loi avec contrainte d'écoulement constante

$$\sigma_0 = Y$$

Ce modèle est utilisé pour les matériaux qui ne s'érouissent pas. Ces différents modèles sont présentés dans la (figure 8). [2]

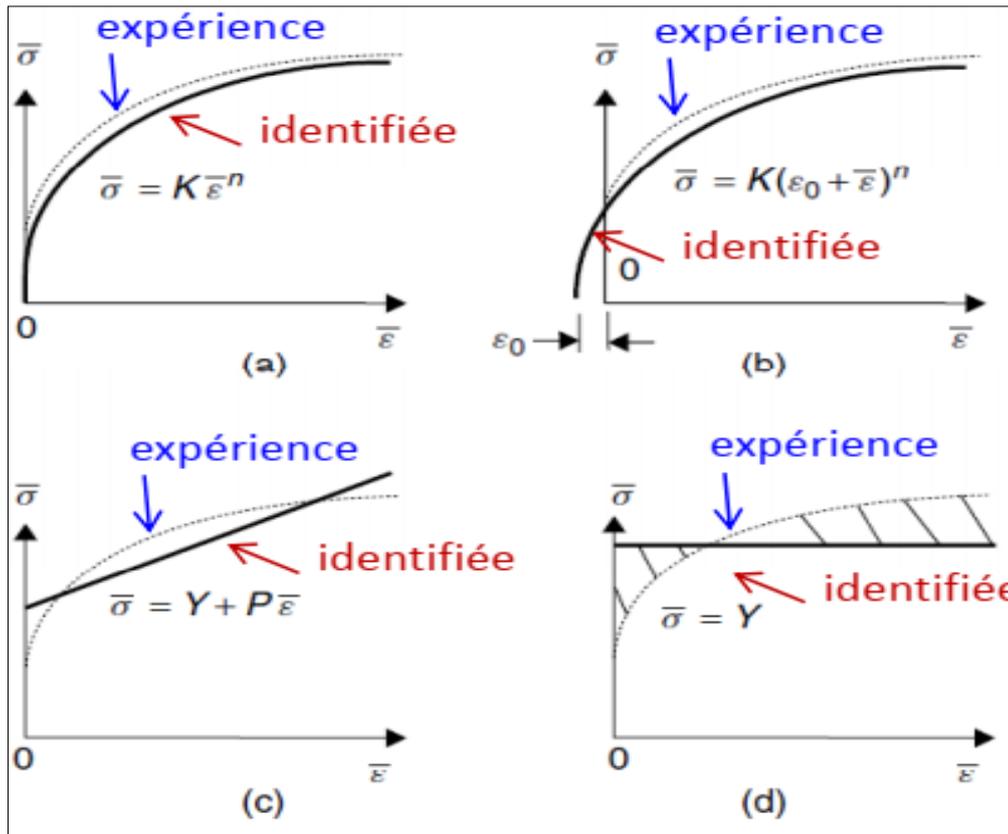


Figure 8 : Modèles d'écrouissage usuels.

8- Fonction seuil

La fonction seuil est donnée est définie par une représentation dans l'espace des contraintes.

$$f(\underline{X}) = f(\sigma_{ij}, R)$$

\underline{X} est une force thermodynamique, elle représente l'écart par rapport à l'équilibre thermodynamique.

$R = \frac{\partial \hat{W}}{\partial P}$, c'est la dérivée de l'énergie d'écrouissage par rapport au chemin moyen parcourue par une dislocation au cours de la déformation plastique.

Dans le ca d'un écrouissage isotrope,

$$f(\underline{X}) = f(\sigma_{ij}, R) = \bar{\sigma} - \sigma_0$$

$\bar{\sigma}$ est une contrainte équivalente et σ_0 est la contrainte d'écoulement donnée par la loi d'écrouissage.

Dans le cas le plus général, c'est-à-dire le cas orthotrope, $\bar{\sigma}$ est donnée par :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{H_{ijkl} \sigma_{kl} \sigma_{ij}}$$

H_{ijkl} est le tenseur d'anisotropie de Hill. Il contient neuf coefficients.

Le nombre de coefficient diminue dans les cas moins généraux comme celui de l'isotropie transverse ou isotropie complète.[11,12,13,14]

9- Conclusion

Cette étude a permis de revoir les outils fondamentaux nécessaires pour une approche saine de l'emboutissage. Il s'avère que l'emboutissabilité de la tôle est fondamentale pour la réussite de cette opération. Pour cela il est indispensable d'identifier la loi de comportement du matériau utilisé dans ce travail. Il s'agira d'une tôle fabriquée au laminoir à froid du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, appelé XES. Cette identification exige un important travail expérimental présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre II:
Étude expérimentale

1. Introduction

La précision des prédictions dépendra de la fiabilité de la loi de comportement. L'objectif de cette partie est l'identification de la loi de comportement.

L'opération d'emboutissage dépend de la nature du matériau mise en forme. Dans le cas de notre étude l'opération a lieu à froid, le cadre général sera donc donné par la plasticité indépendante des vitesses sur la base du principe du travail maximal de Hill. Dans ce cadre, l'identification de la loi de comportement passe par la connaissance de la fonction seuil et de la loi d'érouissage. C'est l'objectif de ce travail expérimental.

Pour cela nous avons prélevé des échantillons de types A5 destinés à l'emboutissage. Ce sont des tôles obtenus après recuit et skin-passe au niveau du LAF.

2. Choix du matériau

Pour la réalisation de notre travail, nous avons étudié une bobine de l'acier XES (A5) correspondant à la nuance présumée FePO4, produit par Arcelor MittalSteel, et destiné à l'emboutissage

XES : est un Produits plats laminés à froid en acier doux a bas carbone pour emboutissage ou pliage à froid

Désignation selon			France NF A 36-401 (1983)
EN 10027-1et ECISS IC 10	EN 10027-2	EN 10130 (1991)	
DC 04	1.0338	PeP04	XES

Tableau 1: Désignation la nuance selon déférent norme[15]

3. Paramètres géométriques de la tôle (Tandem)

Les paramètres géométriques de laminage à froid sont présentés sur le tableau :

Ep : épaisseur.

Ep d'entrée dans 1 ^{er} cage en (mm)	Ep de sortie en 5 ^{eme} cage en (mm)	largeur en (mm)
2,8	0,80	1000

Tableau. 2:Les paramètres géométriques de laminage à froid.

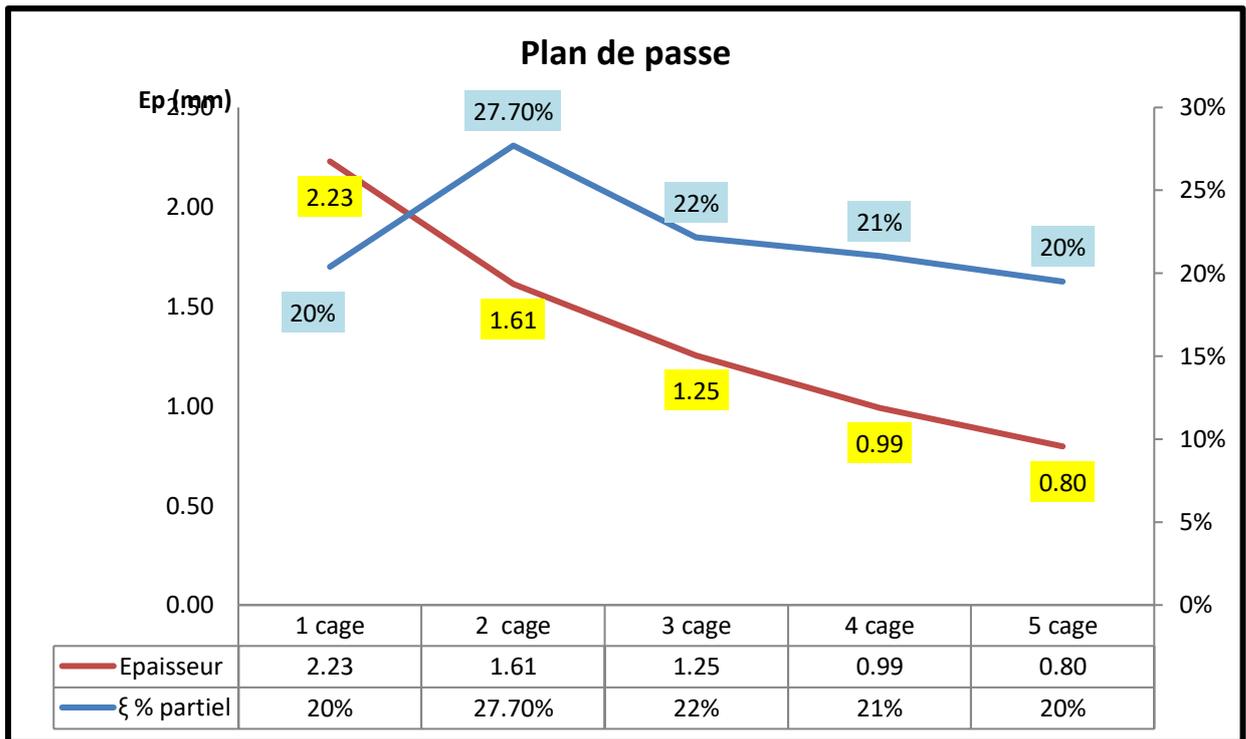


figure1 : courbe présente le taux de réduction et les déformation partiel en fonction de défirant cage.

	Cage (1-2)	Cage (2-3)	Cage (3-4)	Cage (4-5)
limite d'écoulement (MPa)	551	668	724	762

Tableau. 3: l'augmentation de limite d'écoulement par apporte les cinq cage

4. Exigence de la norme NFEN10130

A. Composition chimique

Composition chimique en %(max.) Sur coulée de XES :

Eliment chimique	C %	Mn %	Si %	S %	P %
Concentration en %	0.07	0,40	0,03 max	0,030	0,030

Tableau.4. : Exigence de la norme NFEN10130 de composition chimique [15].

B. Caractéristiques mécaniques

Les exigences de la norme **NF EN 10130** sont représentées dans le tableau III.3 :

E : Module de Young,

R:Contrainte de maximale,

A: l'allongement.

Nuances	Caractéristiques mécaniques des Tôles minces laminées à froid :				
	Re(N/mm ²)	Rm(N/mm ²)	A ₈₀ (%)min	n ₉₀ min. 4)	r ₉₀ min. 4) et 5)
PeP04	210	270-350	38	0,180	1,6

Tableau. 5. : propriétés mécaniques exigées par la norme NF EN 10130 [16].

- 1) Les caractéristiques pour les propriétés mécaniques ne concernent que les produits skin-passés.
- 2) Les valeurs de la limite d'élasticité sont la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % pour les produits ne présentant pas un effet d'écoulement et la limite inférieure d'écoulement (ReL) pour les autres. Dans le cas où l'épaisseur est inférieure ou égale à 0,7 mm, tout en restant supérieure à 0,5 mm, la valeur maximale de la limite d'élasticité est augmentée de 20 N/mm². Pour des épaisseurs égales ou inférieures à 0,5 mm, la valeur maximale de la limite d'élasticité est augmentée de 40 N/mm².
- 3) Dans le cas où l'épaisseur est inférieure ou égale à 0,7 mm, tout en restant supérieure à 0,5 mm, la valeur minimale de l'allongement après rupture est diminuée de 2 unités. Pour des épaisseurs égales ou inférieures à 0,5 mm, la valeur minimale de l'allongement après rupture est diminuée de 4 unités.
- 4) Les valeurs de r₉₀ et n₉₀ ne sont applicables que pour des épaisseurs supérieures ou égales à 0,5 mm.
- 5) Dans le cas où l'épaisseur est supérieure à 2 mm, la valeur de r₉₀ ou de est diminuée de 0,2

5. Préparation Éprouvettes :

le prélèvement et la préparation des éprouvettes doivent être exécutés conformément à la norme européenne EN 10002 partie 1. Le type de l'éprouvette correspond au type n° 2 (80/20 mm).

La longueur entre repères, à choisir entre 50 mm et 80 mm, mais de préférence égale à 80 mm, doit être mesurée à 0,01 mm à l'aide d'un dispositif ayant une précision appropriée. La mesure de la largeur de l'éprouvette doit être faite à 0,005 mm près, à l'aide d'un dispositif ayant une précision suffisante [16]

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dans lesquels sont prélevées les éprouvettes. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement du produit, d'un flan découpé à la presse ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de section constante (profilés, barres, fils, etc.) ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (c'est-à-dire pour les fontes et alliages non ferreux) peuvent être soumis à l'essai sans être usinés. La section droite des éprouvettes peut être circulaire, carrée, rectangulaire, annulaire, ou dans des cas particuliers, d'une autre forme. [17]

6.1. Eprouvettes non usinées

Dans le cas où l'éprouvette est constituée par un tronçon brut du produit ou un barreau d'essai non usiné, la longueur libre entre les mâchoires doit être suffisante pour que les repères soient à une distance raisonnable de ces mâchoires. Types d'éprouvettes à employer dans le cas de produits minces : tôles, feuillards et plats d'épaisseur comprise entre 0,1 mm et 3 mm

6.2. Éprouvette non proportionnelle

La longueur de la partie calibrée doit être au moins égal à $L_0 + b/2$.

En cas de litige, la longueur $L_0 + 2b$ doit toujours être utilisée, sauf manque de matière. Dans le cas d'éprouvettes constituées par des bandes à côtés parallèles de largeur inférieure à 20 mm, et si cela n'est pas spécifié dans la norme de produit, la longueur initiale entre repères (L_0) doit être égale à 50 mm. Pour ce type d'éprouvette, la longueur libre entre les mâchoires est égale à $L_0 + 3b$. Il existe deux types d'éprouvettes non proportionnelles dont les dimensions sont données dans le tableau 7.

Lorsqu'on mesure les dimensions de chaque éprouvette, les tolérances de forme du tableau 8 doivent être respectées.

Dans le cas d'éprouvettes dont la largeur est égale à celle du produit, on peut calculer l'aire de la section initiale (S_0) à partir des dimensions mesurées de l'éprouvette. [17]

Lorsqu'on ne veut pas mesurer la largeur de l'éprouvette au moment de l'essai, on prend comme valeur la largeur nominale de l'éprouvette, à condition que les tolérances d'usinage et de forme données dans le tableau 8 aient été respectées.

Dimensions en millimètres

Type d'éprouvette	Largeur b	Longueur initiale entre repère L ₀	Longueur calibrée L _C	Longueur minimale libre entre mâchoires pour les bondes à coté parallèles
<u>2</u>	20 ± 1	80	120	140

Tableau 6 : Dimensions des éprouvettes

Dimensions et tolérances en millimètres

Largeur nominale de l'éprouvette	Tolérance d'usinage a)	Tolérance de forme b)
20	± 0,105	0,052
<p>a) Tolérances js 12 selon l'EN 20286-2. Ces tolérances sont applicables lorsqu'on désire faire intervenir dans le calcul, la valeur nominale de l'aire de la section initiale (S₀), sans avoir à mesurer cette section.</p> <p>b) Tolérances IT 9 (selon l'EN 20286-2). Ecart maximal entre les mesures de la largeur déterminées tout au long de la partie calibrée (L_C) de l'éprouvette.</p>		

Tableau 7 : Tolérances sur largeur de l'éprouvette[17]

7.1. Analyse chimique

L'analyse chimique a été réalisée au laboratoire central d'**Arcelor Métal** avec un Spectromètre. Cet appareil d'essai permet l'évaporation du matériau de l'échantillon via une décharge destructive, les atomes et les ions libérés sont alors excités et émettent de la lumière, celle-ci est dirigée dans le système optique et mesurée à l'aide des indicateurs (photomultiplicateur).

7.2. Analyse métallographique

7.2.1 Examens au microscope

L'examen des échantillons préparés au moyen du microscope permet l'observation directe de la photographie des échantillons et de mesurer les déformations des éprouvettes de traction. Nous avons utilisé Le microscope « *nikon* » de laboratoire de unité de recherche du martiaux avancé (URMA), avec des grossissements de 25 à 1500 fois.



Figure. 2: le microscope « *nikon* »

Et aussi nous avons utilisé Le microscope « *nikon* » de laboratoire de l'école nationale supérieure de mines et métallurgie(ENSM),avec des grossissements de 25à 1500 fois.

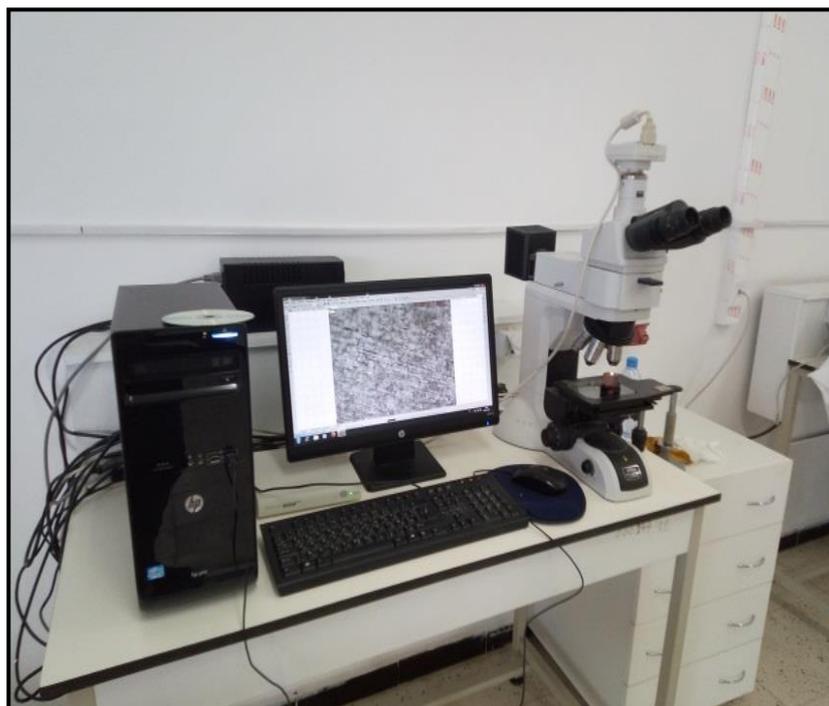


Figure. 3: le microscope « *nikon* ».

8. Les essais mécaniques

Cette partie est la plus importante du chapitre. Avant de présenter les résultats des essais de traction, nous avons effectués des essais de duretés pour évaluer l'évolution des duretés passe par passe.

8.1.Essai de dureté

Les essais ont été réalisés au niveau de laboratoire de département de métallurgie et génie des matériaux. Nous avons utilisé une machine de dureté présentée ci-dessous. Avec Les spécifications suivantes :

- Constructeur: ZWICK / ROELL.
- La dureté : HV5
- Pénétrateur : pyramide à base carré en diamant dont l'angle au sommet est de 136° .



Figure. 4. :d'uromètre universel.

8.2.Essai de traction

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire du de unité de recherche du martiaux avancé(URMA). Nous avons utilisé une machine de traction (figure 4).

Avec les spécifications suivantes :

- Constructeur: MTS Creterion ;
- Model : 43
- Capacité maximale : 5kN (50 tonnes) ;
- Vitesse de déformation de l'essai : 0,016667 mm/s;
- Température : 25°C ;
- Affichage sur écran de l'ordinateur de la machine.



Figure. 5: Machine de traction « MTS »

9. Identification de la loi de comportement

9.1. Cadre et formalisme général

Le modèle que nous avons utilisé est le modèle classique utilisé, il correspond au cas de la plasticité associée avec critère de Hill où la fonction seuil $f(\sigma_{ij})$ est égale au potentiel plastique $g(\sigma_{ij})$.

Il fait intervenir la fonction seuil $f(\sigma_{ij})$ qui coïncidera avec le potentiel plastique et la loi d'écouissage $Y(p)$ où p est la variable d'écouissage anisotrope ($\lambda = \dot{p}$) ET $p = \int \dot{p}.dt$ ainsi qu'une loi d'évolution tel que présenté ci-dessous

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_{ij} = 0 \quad \text{si} \quad \bar{\sigma} - Y(p) < 0 \\ \dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \quad \text{si} \quad \bar{\sigma} - Y(p) = 0 \\ \lambda = \dot{p} = \dot{\epsilon} = \sqrt{h_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \dot{\epsilon}_{ij}} \end{array} \right.$$

Il en ressort que pour identifier complètement ce modèle, il suffit d'identifier la loi d'écouissage $Y(p)$ et la fonction seuil. C'est ce que nous présentons dans ce qui suit.

9.2. Fonction seuil

Une fonction seuil représente la contrainte équivalente. Elle représente la taille de la fonction seuil dans l'espace des contraintes. Différents cadres peuvent être posés. Comme utilisé classiquement en mise en forme, nous proposons les cadres classiques donnés par Hill.

Hill donne $\bar{\sigma} = \sqrt{H_{ijkl} \sigma_{kl} \sigma_{ij}} = \sigma_0$

$$H = h^{-1}$$

H_{ijkl} : Tenseur d'anisotropie de Hill. L'hypothèse d'insensibilité à la pression hydrostatique permet d'écrire :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{H_{ijkl} \sigma_{kl} \sigma_{ij}} = \sqrt{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2} = \sigma_0$$

On retrouve aussi d'autres critères dont ceux qui ne sont pas quadratiques

Discussion

L'identification de la fonction seuil est une étape importante pour identifier la loi de comportement. il est recommandable d'utiliser le critère de Hill pour le l'opération de l'emboutissage afin d'obtenir des résultats fiables, cette dernière recommandation dépendra des résultats expérimentaux obtenus.

9.3. Lois d'écouissage

On retrouve une multitude de modèles pouvant décrire l'écouissage des matériaux, les plus usités en mise en forme des métaux sont les modèles d'Hollomon de Ludwick et de Swift.

A. Modèle d'Hollomon :

Elle est aussi appelée loi puissance.

Cette loi est très simple et convient pour les aciers doux ou mi- durs, ainsi que pour les métaux ou alliages à faible limite d'élasticité, par contre, elle ne constitue qu'une approximation grossière pour les alliages à haute résistance

$$\bar{\sigma} = A\bar{\varepsilon}^n$$

A est la valeur de la contrainte d'écoulement pour une déformation totale égale à 1 et n le coefficient d'écrouissage. Il représente la faculté du matériau à se déformer plastiquement avant striction.

En utilisant une loi d'évolution ($\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}}$), on démontre aisément que pour le cas plasticité

de Von Misés on obtient $\bar{\sigma} = \sigma$ et $\bar{\varepsilon} = \varepsilon$ suivant la direction de charge de traction.

B. Modèle de Ludwick :

Ce modèle donne de bonnes prédictions pour les aciers alliés, les aciers à haute résistance, les aciers austénitiques et les alliages d'aluminium. Elle est formulée comme suit :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + A\bar{\varepsilon}^n$$

σ_0 : La limite élastique, en pratique on prend souvent la contrainte à 0,2% de déformation.

C. Modèle de Swift :

Il s'écrit :

$$\bar{\sigma} = A(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n$$

Ce modèle convient mieux pour les aciers à haute limite d'élasticité.

$$\varepsilon_1 \sigma_1 \Rightarrow \varepsilon + \varepsilon_0 = \varepsilon = 1$$

Cette loi revient à translater de ε_0 la courbe de la loi puissance parallèlement à l'axe [11,12,13,14].

Discussion

Du fait qu'il donne les meilleures prédictions pour les aciers ordinaires, nous concluons que le modèle d'Hollomon convient mieux pour notre travail. Pour cela, nous devons réaliser des essais de traction qui donnent des courbes conventionnelles. Afin d'exploiter au mieux nos résultats expérimentaux nous devons traduire nos courbes expérimentaux (conventionnelles) en courbes rationnelles, c'est-à-dire celles qui donnent les contraintes et les déformations vraies. C'est ce que nous présentons dans ce qui suit.

10. Passage d'une courbe conventionnelle a une courbe rationnelle

Le diagramme rationnel est une représentation de la courbe de traction avec en ordonnée la contrainte vraie qui tient compte de variation de section au cours de l'essai, et en abscisse la déformation rationnelle [18].

$$S_0 L_0 = S_v L \Rightarrow S_v = \frac{S_0 L_0}{L_0 + \Delta L} = \frac{S_0}{1+e}; e = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ Donc } \sigma = \frac{F}{S_v} = \frac{F}{S_0} (1+e)$$

Alors $\sigma_v = \sigma_c (1+e)$

D'autre part on a la déformation logarithmique $\varepsilon_v = \ln \frac{L_f}{L_0} \Rightarrow \varepsilon_v = \ln(e+1)$.

11. Identification de la loi d'érouissage

Nous avons utilisé le modèle d'érouissage de d'Hollomon.

Le modèle d'Hollomon $\sigma = A \varepsilon^n$. Il s'agissait d'identifier A et n . Pour cela, des essais de traction simple suffisent.

Ce coefficient exprime la faculté du matériau à se déformer plastiquement avant la striction.

On pourra à cet effet le mesurer par une lecture directe d'une courbe de traction.

Démonstration :

A la charge maximale le démarrage de l'instabilité correspond à $\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = 0$ et $F = \sigma s$

Avec $\varepsilon = \ln \frac{s_0}{s} \Rightarrow s = s_0 e^{-\varepsilon} \Rightarrow F = \sigma s_0 e^{-\varepsilon}$

Donc: $\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} s_0 e^{-\varepsilon} - \sigma s_0 e^{-\varepsilon} = 0 \Rightarrow s_0 e^{-\varepsilon} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} - \sigma \right] = 0 \Rightarrow s_0 e^{-\varepsilon} \neq 0$ et $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \sigma$

$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \sigma = A n \varepsilon^{n-1} \Rightarrow \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = n A \varepsilon^{n-1}$

Donc : $\frac{n}{\varepsilon} = 1 \Rightarrow n = \varepsilon_h$

Où ε_h : allongement plastique homogène (avant striction).

Comme nous avons la possibilité d'effectuer plusieurs essais de traction (cela permet bien sur d'obtenir des résultats plus précis), il est donc judicieux d'utiliser une méthode statistique. La

plus indiquée dans ce cas est la méthode des moindres carrés. Nous présentons cette méthode dans ce qui suit [11.13].

12. Méthode des moindres carrés

Loi d'Hollomon : $\sigma = A\varepsilon^n$

En logarithme, on obtient : $\ln \sigma = \ln A + n \ln \varepsilon$

On pose : $y = \ln \sigma$, $X = \ln \varepsilon$

La corrélation donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \frac{\sum (X - \bar{X})(y - \bar{y})}{\sum (X - \bar{X})^2} \\ A = \exp(\bar{y} - n\bar{X}) \end{array} \right.$$

13. Préparation des échantillons :

On a découpé quatre échantillons (tôle d'acier XES) de différent épaisseur À partir de différent bobine come se site dans le tableau sous dessous avec ses destination :

Nombre d'échantillon	Largeur en (mm)	Longueur en (mm)	Epaisseur en (mm)	Destination
2	1000	1000	0,8	Un pour préparer les échantillons de traction, dureté, spectromètre et métallographe, et l'autre pour l'emboutissage
1	1000	1000	0,9	pour l'emboutissage
1	1000	1000	1,5	pour l'emboutissage

Tableau 8 : démontions des échantillons et leur destination

La première tôle était découpe pour préparer les éprouvettes de traction suivant différent direction 0°,30°,45°,60°et90° par apport la direction de laminage, on découpe pour chaque direction cinq éprouvette de traction et le reste de matière pour les échantillon de dureté, spectromètre et métallographe ;comme était présenté dans le schéma suivant :

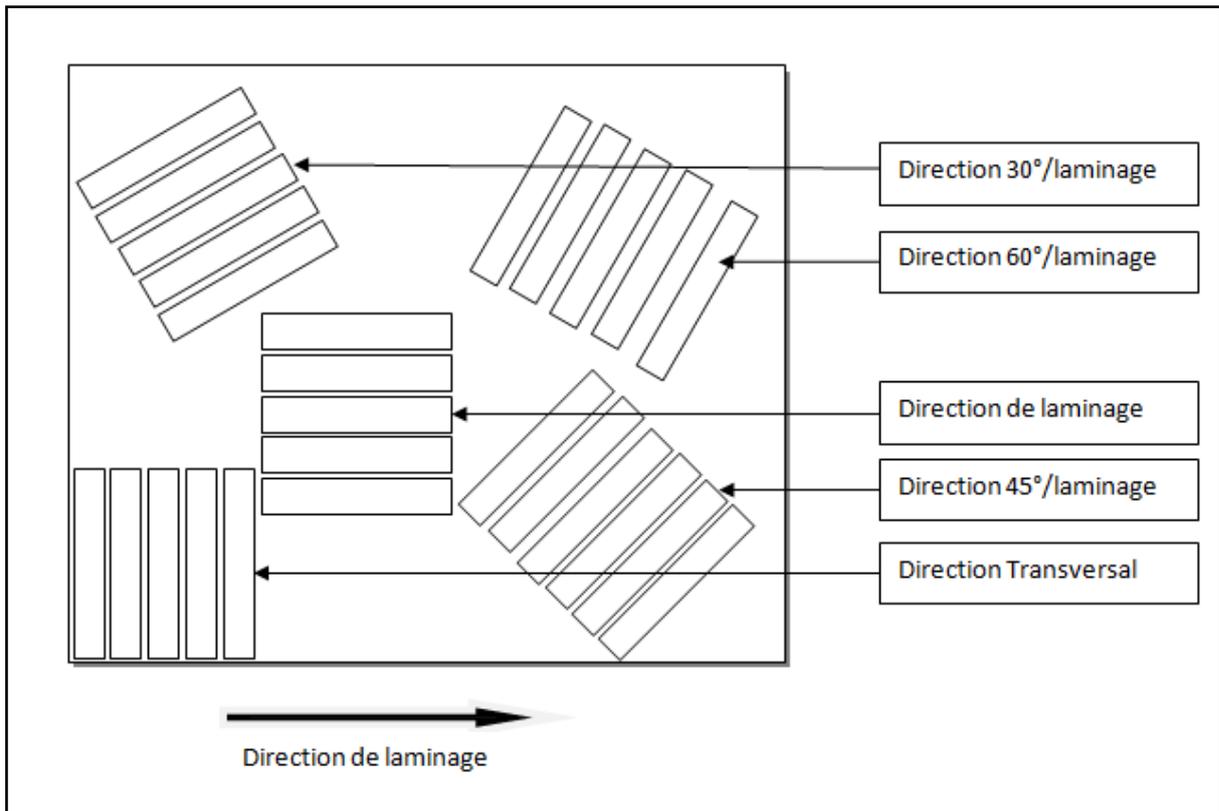


Figure 6 : schéma présenté comment on a découpé les échantillons

Les éprouvette de traction sont découpé suivant la norme EN 10002-1 dance la forme et les démentions des éprouvette comme se suie :

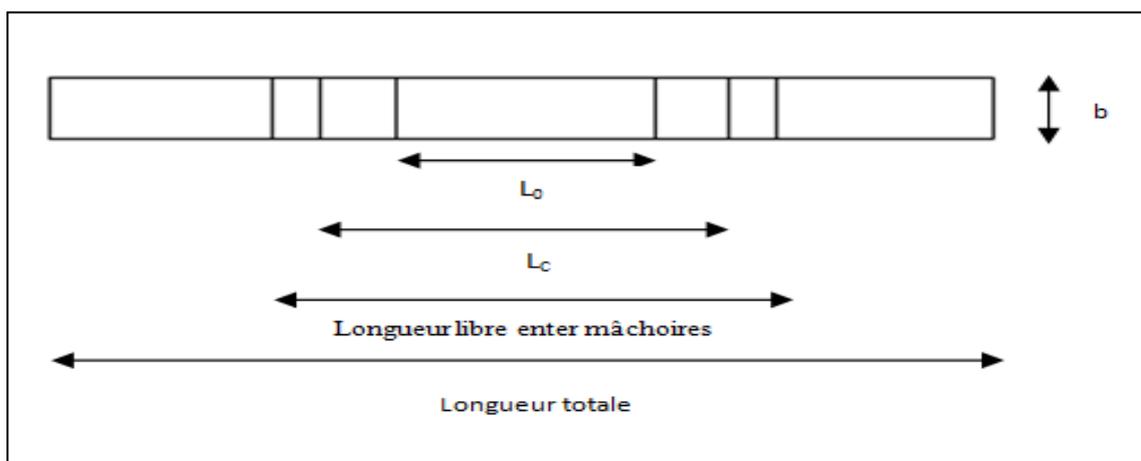


Figure 7 : les démontions et les déférant parte de les éprouvettes de traction .

Courbe rational de traction direction de laminage:

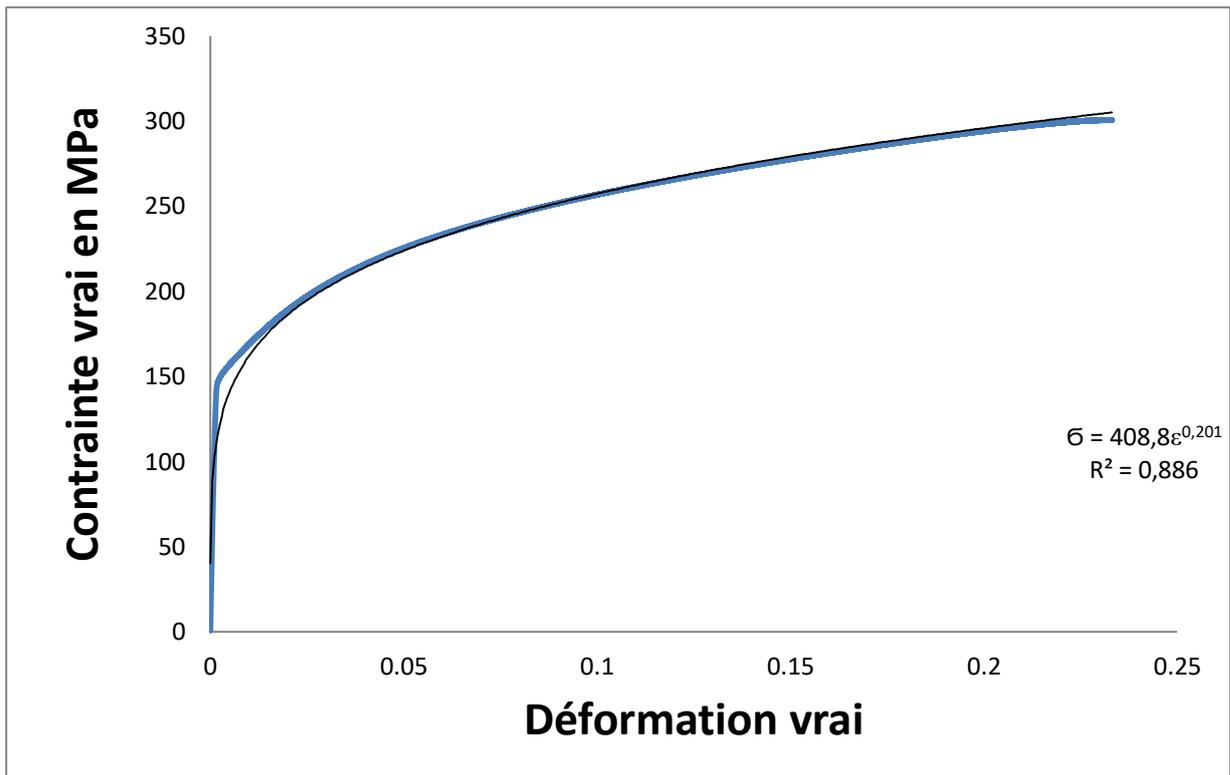


Figure10 : Courbe rational de traction direction de laminage

Courbe rational de traction direction 30° laminage:

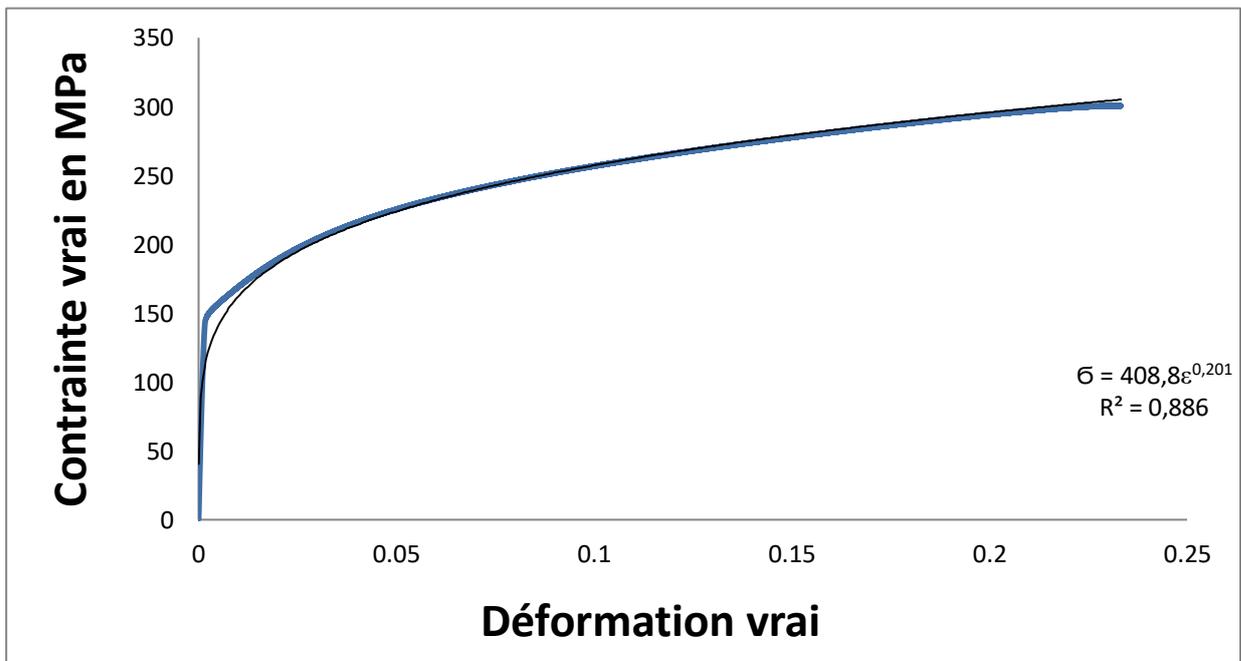


Figure11 : Courbe rational de traction direction 30° laminage

Courbe rationnel de traction direction45/ laminage:

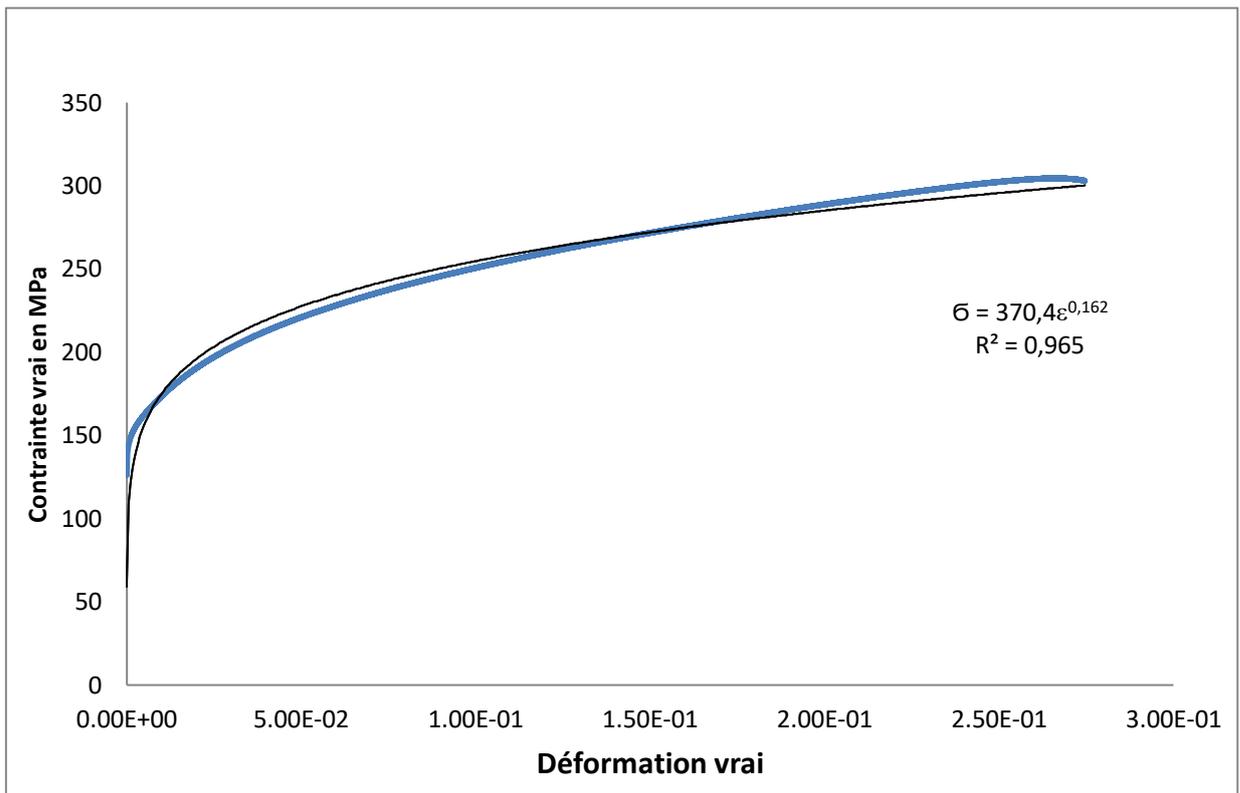


Figure12 : Courbe rationnel de traction direction45/ laminage

Courbe rationnel de traction direction60/ laminage:

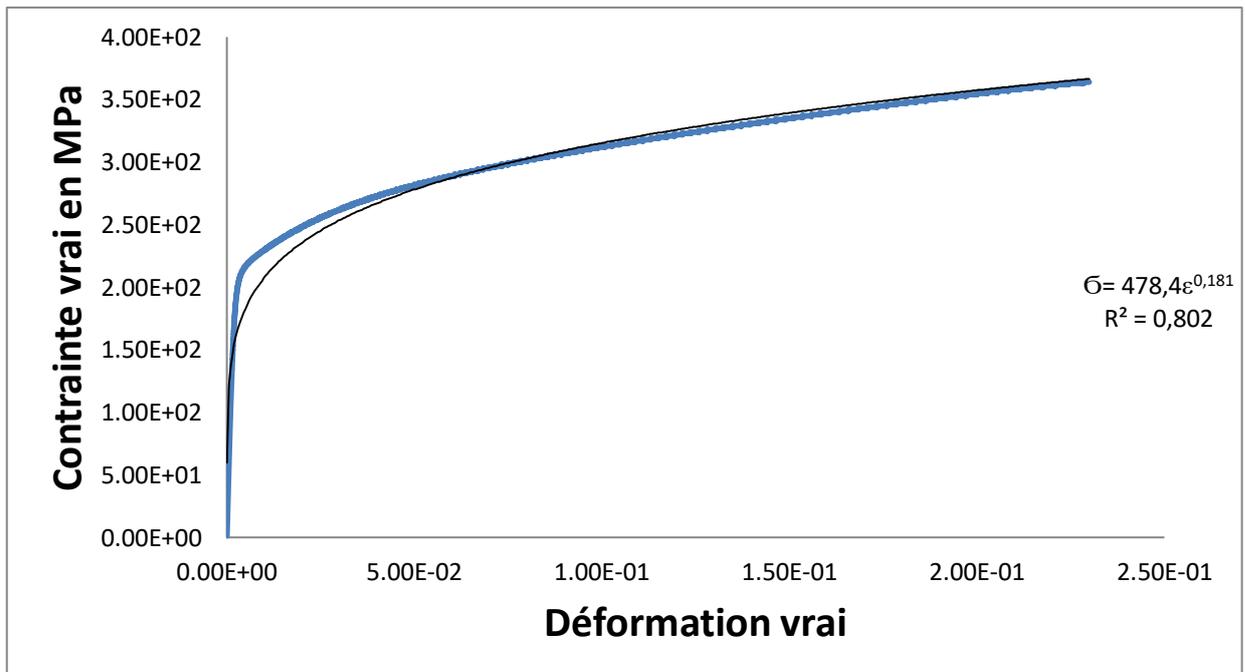


Figure13 : Courbe rationnel de traction direction60/ laminage

Courbe rationnel de traction direction transversal:

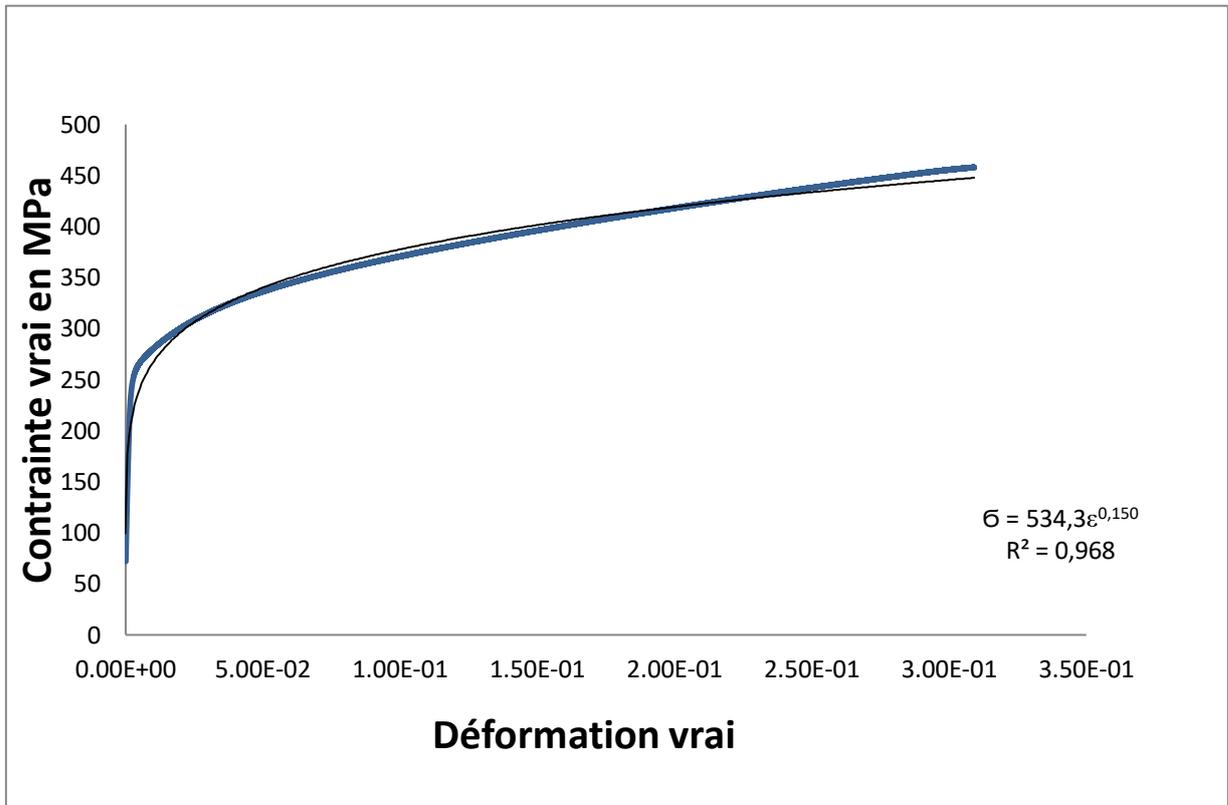


Figure14 : Courbe rationnel de traction direction transversal

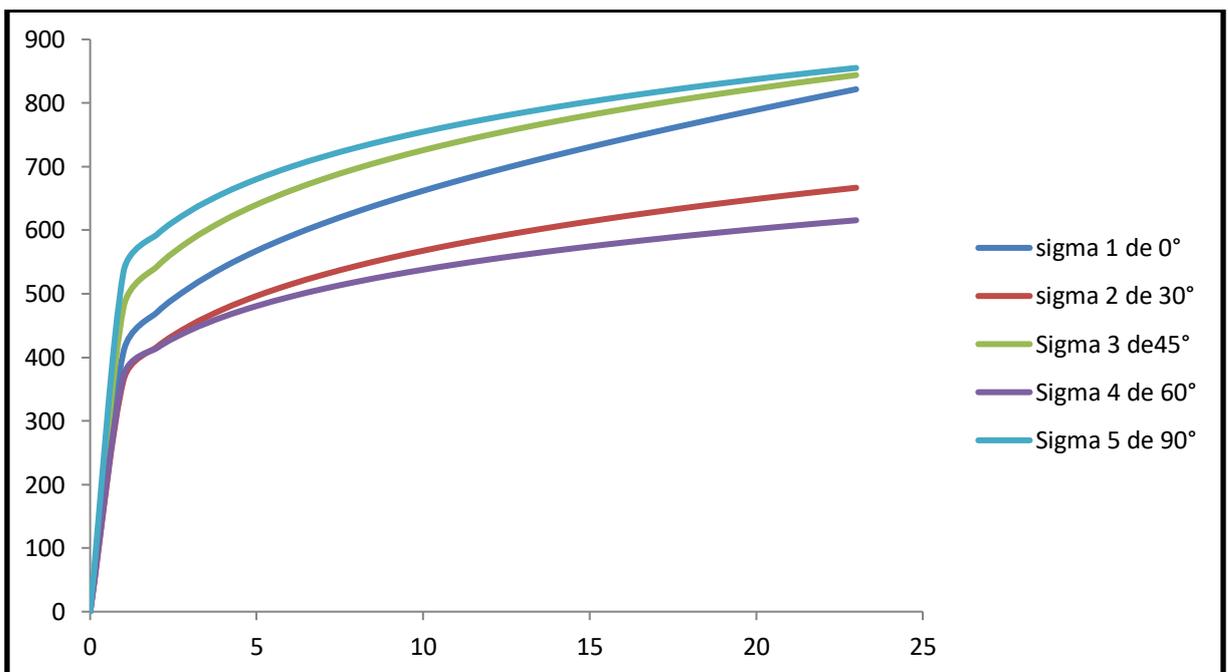


Figure15 : Courbe rationnel de traction de toute direction en fonction de déformation vrai

On réalise aussi des essais de traction (deux éprouvette pour chaque direction) comme se suie :

_A l'aide microscope optique on mesure la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette initiale (largeur avec un grossissement de 25X et l'épaisseur avec un grossissement de 50X).



Figure16 :0° -- 1 0 %

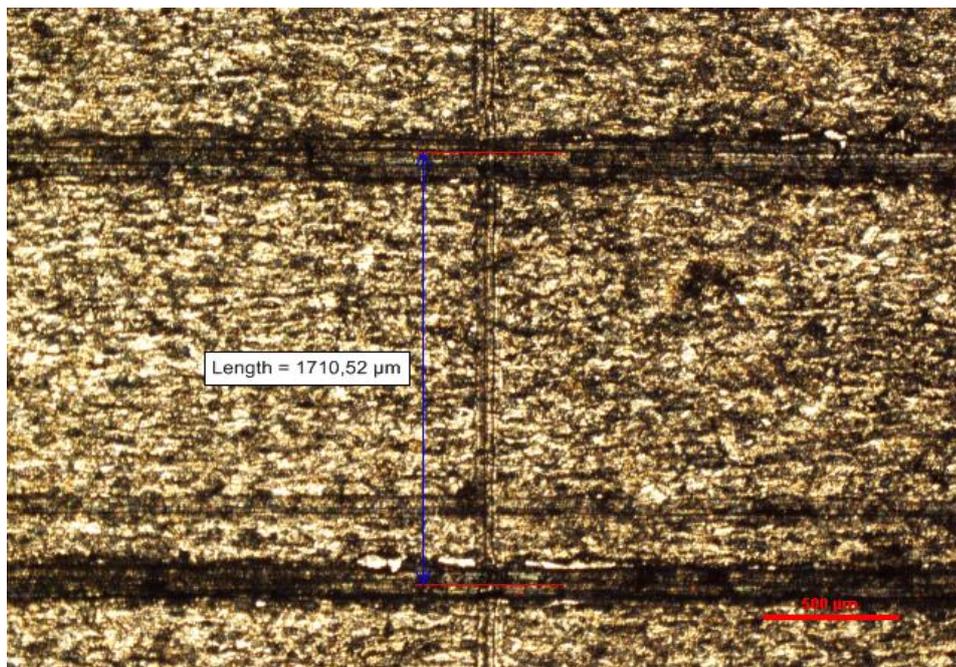


Figure17 :0° --- 1 20%

_ On fait une traction de 5% de déformation.

_ Après on remesure la largeur et l'épaisseur avec les mémés grossissement.

On répète mémé étape jusque à la rupture des éprouvettes.

Les résultantes de mesure de largeur et épaisseur après chaque 5% de déformation sont présenté dans les tableaux suivant:

	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₅
0°-1	2054,49	1950,393	1881,316	1742,26	1710,52	1687,91	1643,9533
0°--2	1800,28	1745,683	1716,76	1690,49	1646,47	1610,0466	Rupture
30°--1	2113,5	1906,44	2023,233	1975,472	1929,04	1895,13	Rupture
30°--2	1909,98	1880,06	1833,593	1779,391	1748,196	1708,635	Rupture
45°--1	2053,29	1975,09	1922,763	1847,195	1841,13	1818,523	1793,406
45 °--2	2242,36	2194,033	2150,08	2035,946	1995,446	1955,42	Rupture
60°--1	1960,56	1896,39	1848,666	1823,372	1782,132	1733,12	Rupture
60 °--2	2241,15	2089,796	2072,21	1971,807	1920,25	2011,933	Rupture
90°--1	1785,94	1768,286	1729,353	1658,444	1651,49	1602,513	Rupture
90°--2	2097,84	2062,163	2018,213	1936,989	1901,41	1853,683	1847,41

Tableau 9 : Les résultantes de mesure de largeur après chaque 5% de déformation

	e ₀	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆
0°-1	755,65	744,21	732,51	723,79	718,955	709,1	669,776
0°--2	761,226	748,52	696,78	690	669,66	666,59	Rupture
30°--1	736,67	696,776	689,38	683,84	691,23	670,9	Rupture
30 2	728,396	699,24	690,61	675,8166	664,743	663,51	Rupture
45 1	759,5	736,82	692,46	687,54	683,84	666,28	665,36
45 2	732,996	712,17	699,42	692,46	678,29	670,9	Rupture
60 1	768,95	748,5	710,49	707,25	703,556	686,92	Rupture
60 2	778,93	760,233	749,75	739,283	734,3533	730,046	Rupture
90 1	762,07	745,44	736,2	717,7233	709,71	706,945	Rupture
90 2	759,12	744,21	740,51	739,285	730,66	722,04	710,95

Tableau 10 :Les résultantes de mesure épaisseur après chaque 5% de déformation

15. Résultats expérimentaux

2-1 Coefficients d'anisotropie

Coefficients d'anisotropie était calcule en fonction de la relation suivant et à partir des résultats du tableau précédant

$$r = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(e/e_0)}$$

Aussi r est un moyen de deux échantillon (1et2)

15.1. direction de laminage

Déformation vrai	Coefficient d'anisotropie r _{0°}
0,04879016	1,83
0,09763747	1,88
0,1464562	1,96
0,19526542	2,16
0,24405558	2,23

Tableau11 : présenté le coefficient d'anisotropie r_{0°} de direction de laminage

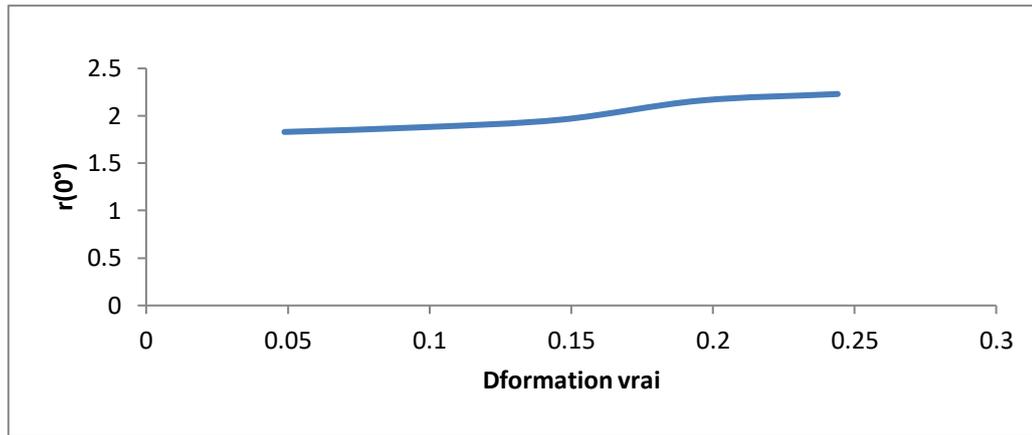


Figure 18 : Courbe présentée le coefficient d'anisotropie r_{0° de direction de laminage en fonction de déformation vrai

15.2. Direction 30° par apport laminage

Déformation vrai	Coefficient d'anisotropie r_{30°
0,0487235	0,65787768
0,09751366	0,90756659
0,14632287	1,16614604
0,19513208	1,43437387
0,24392225	1,85192223

Tableau 12 :présenté coefficient d'anisotropie r_{30° de direction 30°

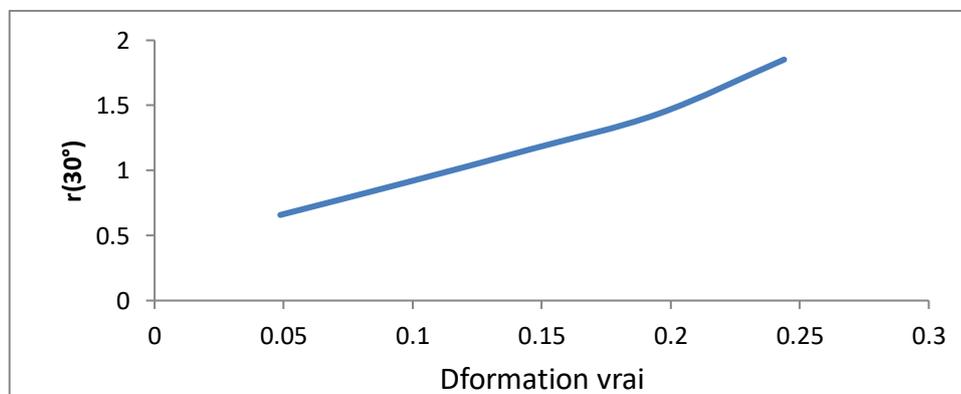


Figure 19 : Courbe présentée le coefficient d'anisotropie r_{30° de direction 30°/laminage en fonction de déformation vrai

15.3. Direction 45° par apport laminage

Déformation vrai	Coefficient d'anisotropie r_{45°
0,04879969	0,89
0,0976089	1,28
0,14640859	1,37
0,19520828	1,5
0,24399844	1,64

Tableau13 : présenté coefficient d'anisotropie r_{45° de direction 45°

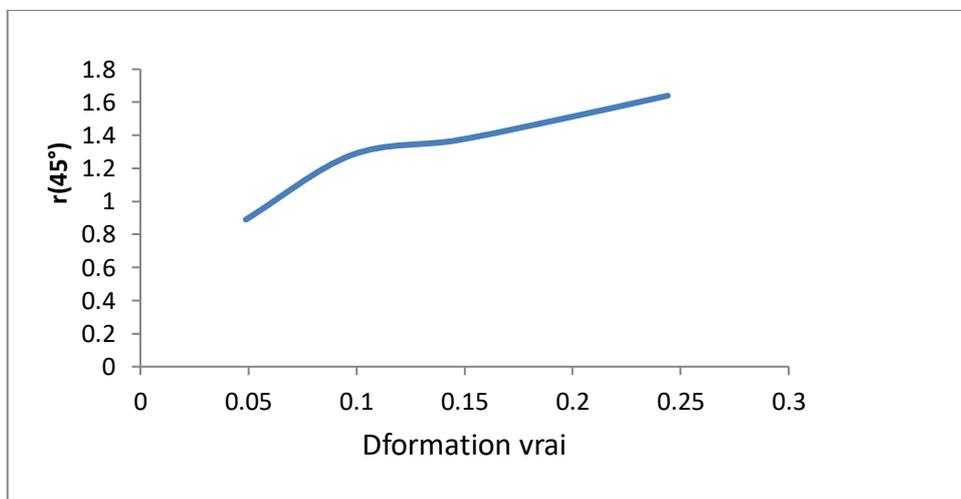


Figure 20 : Courbe : présenté le coefficient d'anisotropie r_{45° de direction 45°/laminage en fonction de déformation vrai

15.4. direction60° par apport laminage

Déformation vrai	Coefficient d'anisotropie r_{60°
0,04881874	1,23
0,09761842	1,39
0,14641811	1,45
0,1952178	1,66
0,24405558	1,84

Tableau14 : présenté coefficient d'anisotropie r_{60° de direction 60°

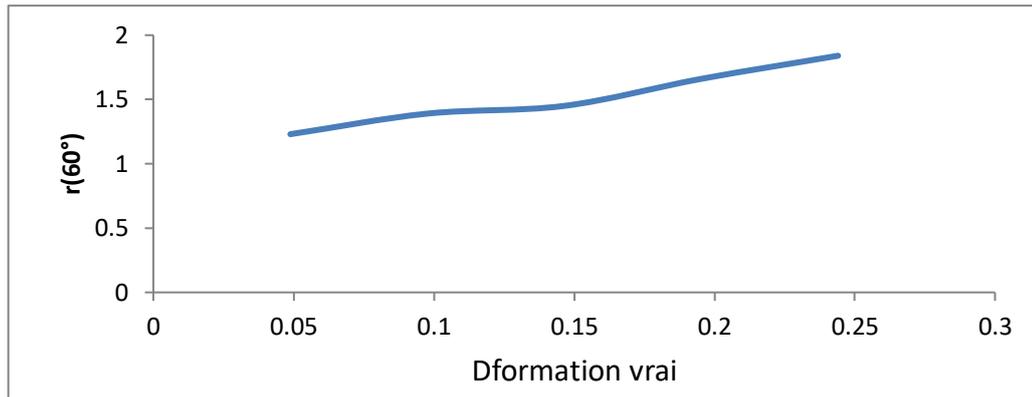


Figure 21 : Courbe : présenté le coefficient d'anisotropie r_{60° de direction 60° /laminage en fonction de déformation vrai

15.5. direction 90° par apport laminage

Déformation vrai	Coefficient d'anisotropie r_{90°
0,04879016	0,65
0,09758033	1,25
0,14638002	1,68
0,19517018	1,75
0,24396035	1,9

Tableau 15 : présenté coefficient d'anisotropie r_{90° de direction 90° /laminage en fonction de déformation vrai

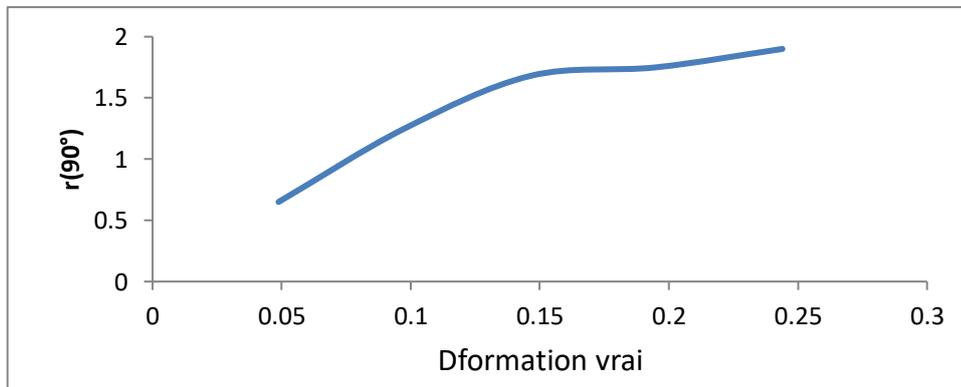


Figure 22 : Courbe : présenté coefficient d'anisotropie r_{90° de direction 90° /laminage en fonction de déformation vrai

15.6. l'évolution de la σ_0 en fonction de la direction / laminage :

Direction /laminage en (red)	σ_0
0	150,38
0,523	152,15
0,78	160,4
1,04	168,48
1,57	207,07

Tableau 16: présenté l'évolution de la σ_0 en fonction de la direction / laminage

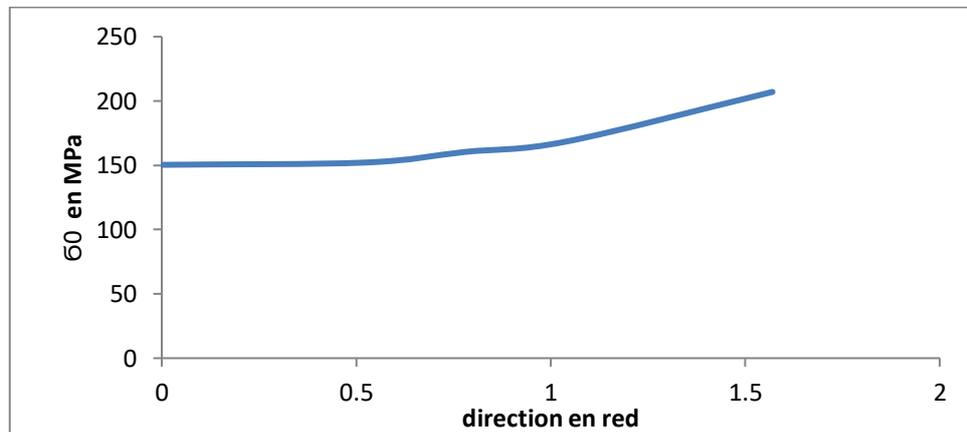


Figure 23 : Courbe de l'évolution de la σ_0 en fonction de la direction / laminage

15.7. l'évolution de l'anisotropie en fonction de la direction :

Direction /laminage en (red)	$\sigma_0/\sigma_0(0^\circ)$
0	1
0,523	1,01177018
0,78	1,0666321
1,04	1,12036175
1,57	1,37697832

Tableau17 : présenté l'évolution de l'anisotropie en fonction de la direction

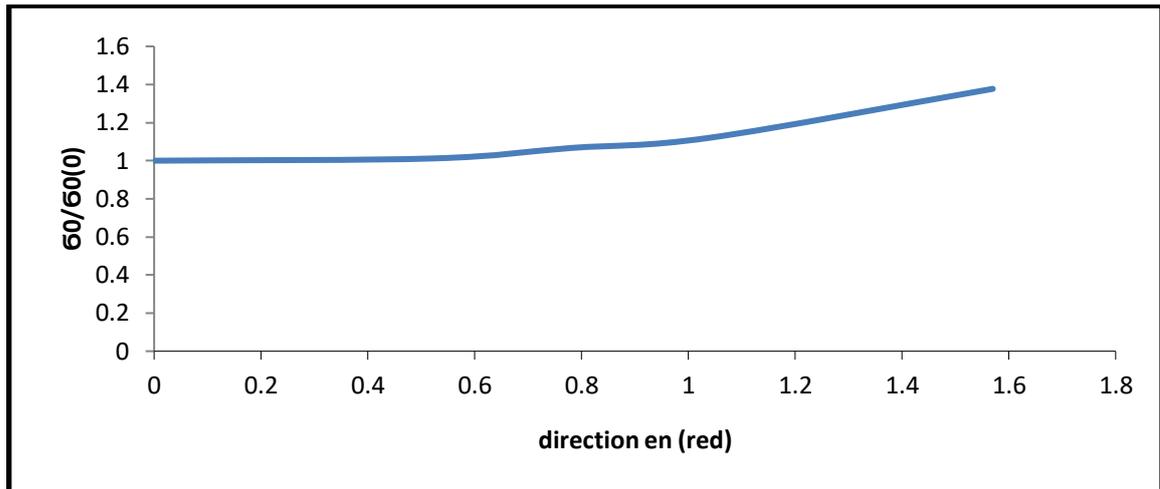


Figure 24 Courbe présenté

15.8. : coefficients d'écouissage (A et n)

A partir de l'équation des les courbes tendances on détermine les coefficients d'écouissage n et A. l'équation s'écrire de la manière $A\varepsilon^n$ (modale d'Hollomon $\bar{\sigma}=A\varepsilon^n$)

Direction /laminage	A	n
0°	408 ,8	0,201
30°	364,0	0,193
45°	370 ,4	0,162
60°	487,4	0,181
90°	534,0	0,150

Tableau18 : présenté A et n en fonction de la direction

16. Résultats et analyse des investigations

16.1. Composition chimique

L'analyse chimique sur échantillon de la bobine a donné les résultats suivants :

Eléments	Teneur %	Eléments	Teneur %
C	0,04	Ti	0,001
Mn	0,22	Nb	0,001
Si	0,01	Ni	0,009
P	0,006	Cr	0,015
S	0,007	Mo	0,002
Cu	0,044	V	0,001
Al	0,082	Sn	0,001
N	0,017	Fe	99,542

Tableau. 19:Composition chimique.

16.2. métallographique

Cette partie a pour objectif d'identifier les phases en présence de notre acier. Elle nous permettra aussi d'avoir des renseignements sur la texture donnée par le laminage et donc la nécessité de prendre en compte ou non l'anisotropie.

Les figures que nous présentons ci-dessous sont obtenues après skin passe.

16.2.1. Examens micrographique

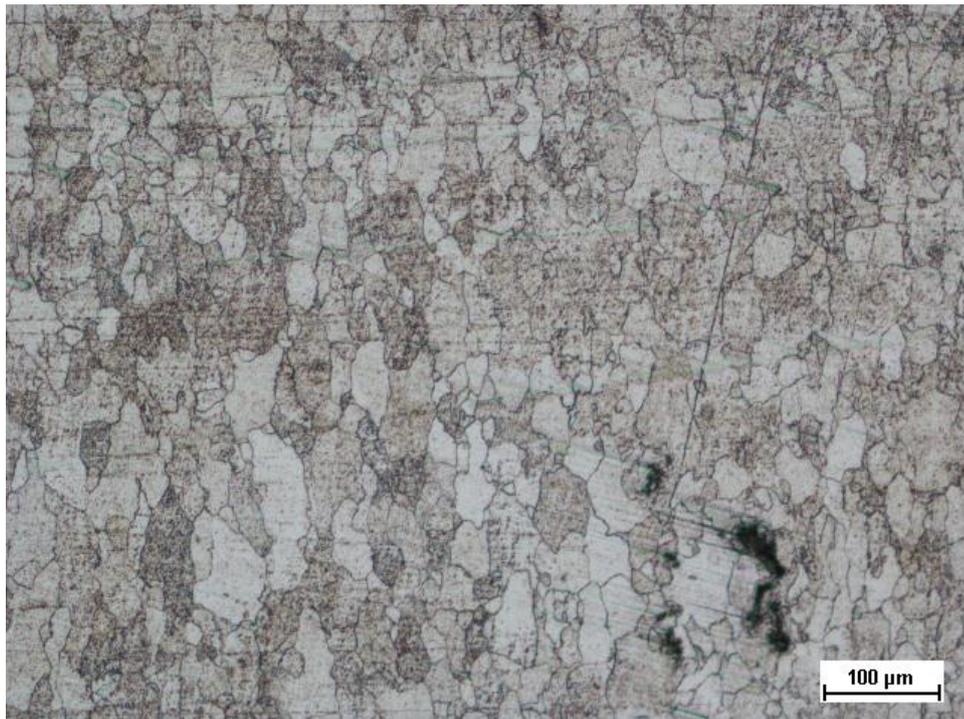


Figure25:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 100X.

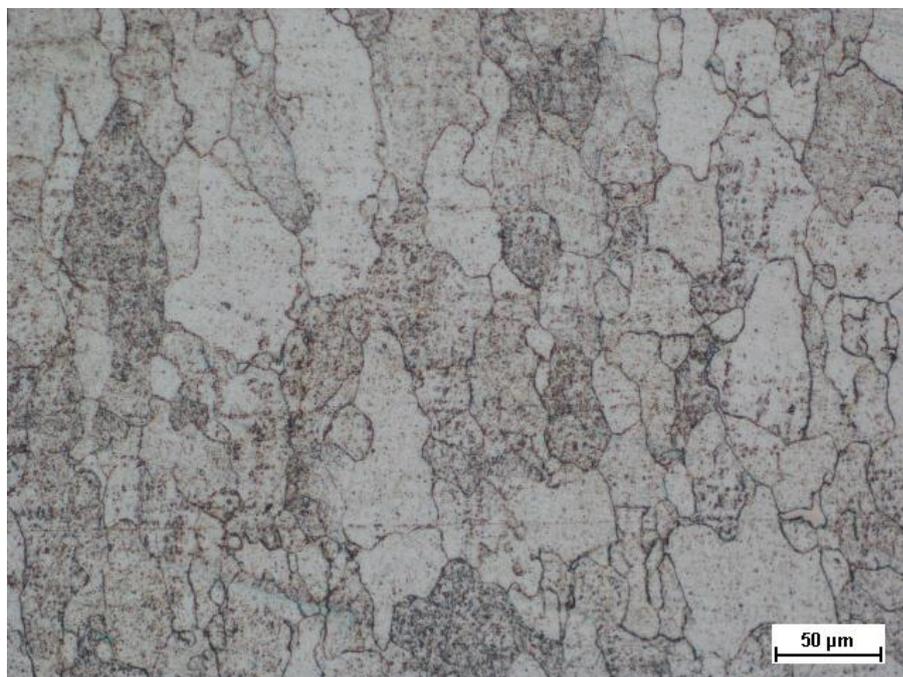


Figure26:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 200X.

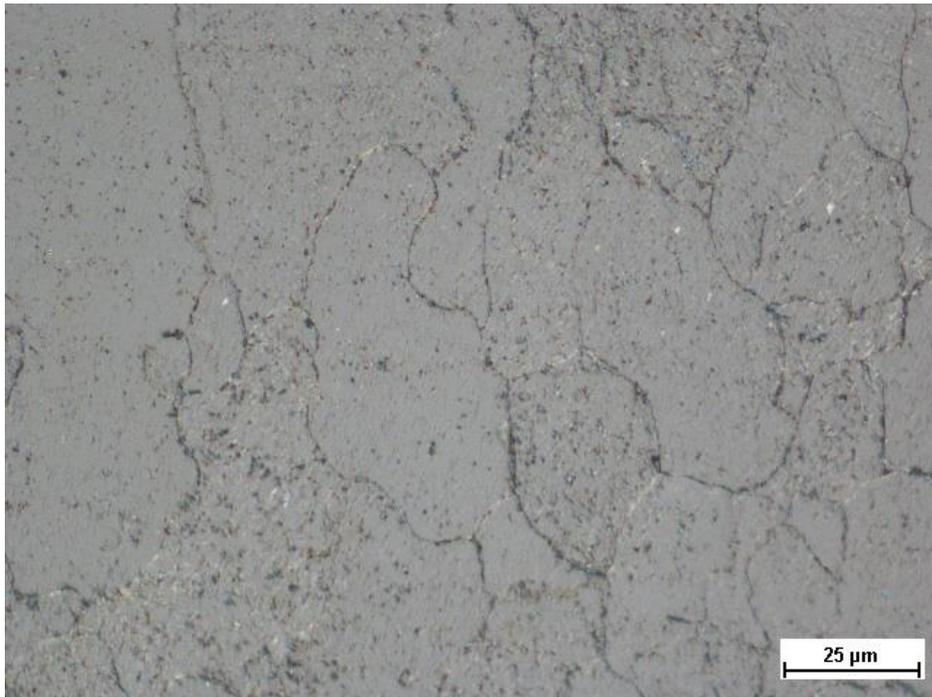


Figure 27 :Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 500X.

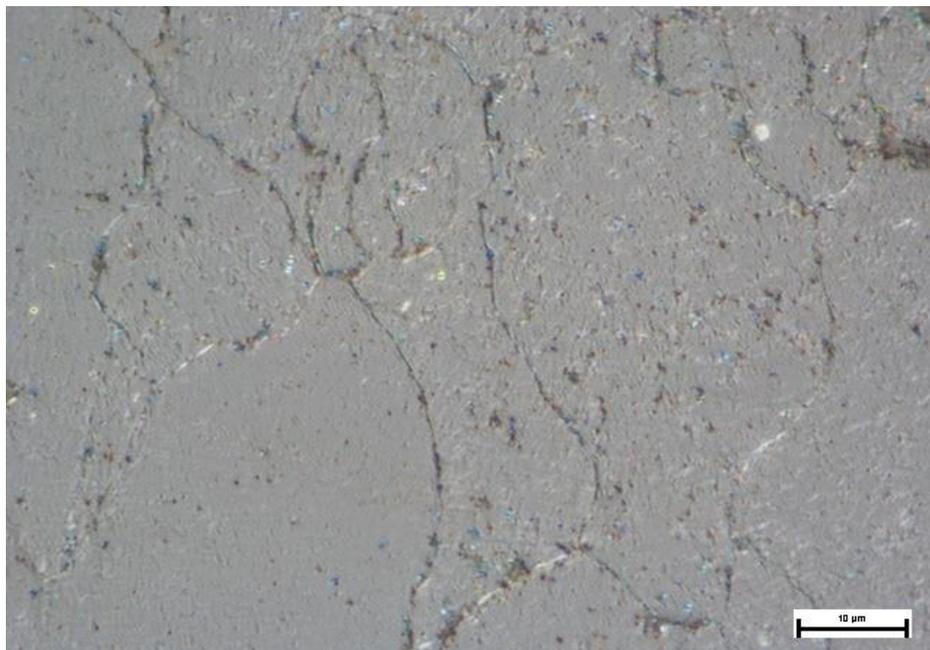


Figure28:Micrographie de la bobine XES après skin passe Structure ferrito- perlitique avec grossissement 1000X.

Essai de dureté HRB

On a mesuré la dureté HRB pour la tôle étudiée après laminage recuit et skin passe, Les mesures ont été effectuées en plusieurs endroits.

Les résultats obtenus sont représentés dans la courbe suivant :

	Après skin passe			
N° d'essai	1	2	3	Moyen
Dureté HRB	47,5	48,5	48,2	48,666

Tableau. 20: résultat de l'essai de la dureté.

18. Conclusion

- ✓ Les essais de traction sur des échantillons prélevés nous ont permis d'identifier la loi d'érouissage.

- ✓ Les examens métallographiques et les résultats des essais de traction suivant les directions longitudinales, transversales et à 30,45 et 60 degrés ont montré qu'il est possible de modéliser l'emboutissage en posant le cadre de Von Misés du fait de la faible anisotropie.

- ✓ L'analyse des courbes d'érouissage suivant les différentes directions justifie très confortablement l'hypothèse d'érouissage isotrope que nous utilisons pour modéliser le comportement plastique de notre tôle.

- ✓ Les courbe d'érouissage identifier sont très proche des courbes expérimentaux.

*Chapitre III : étude de
l'emboutissabilité de la
tôle XES*

1. Introduction

La qualité de la tôle utilisée pour l'emboutissage est fondamentale pour la réussite de l'opération d'emboutissage. Comme présenté dans l'introduction à ce travail, l'objectif est d'étudier la possibilité d'emboutir la tôle XES avec une épaisseur minimale sans striction. L'application du critère de Swift est proposée dans cet objectif. Le cadre de comportement est donné d'abord par la plasticité de Von Misés pour être ensuite généralisé au cadre de Hill pour prendre en compte l'anisotropie. On propose d'abord de présenter le critère de Considère puis de Swift

2. Critère de Considère :

Cette approche est fondée sur le fait que, si la force de traction F est une fonction croissante de la déformation équivalente, toute zone ayant subi une déformation supérieure à celle de son voisinage (du fait, par exemple, d'une section initiale plus faible, ou encore d'une hétérogénéité microstructurale) se déforme plus rapidement que le reste de l'éprouvette de traction, c'est-à-dire forme une striction. Le critère d'instabilité de Considère s'écrit donc :

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = 0 \quad (1)$$

Si σ_0 désigne la contrainte d'écoulement, et S_0 la section initiale de l'échantillon,

$F = \sigma_0 S_0 \exp(-\varepsilon)$ de sorte que la relation devient :

$$\frac{d \ln \sigma_0}{d\varepsilon} = 1 \quad (2)$$

En pratique, aux faibles déformations, $d \ln \sigma_0 / d\varepsilon > 1$ car l'écrouissage est dominant.

La striction débute lorsque l'écrouissage ne compense plus la réduction de section

de l'éprouvette, de telle sorte que $\frac{d \ln \sigma_0}{d\varepsilon}$ devient inférieur à l'unité.

Exemple. Considérons le cas d'un matériau viscoplastique il a la possibilité d'être écroui ou σ_0 est fonction de la déformation $\bar{\varepsilon}$ et de la vitesse de déformation équivalente $\dot{\bar{\varepsilon}}$

Pour un essai de traction à vitesse de déformation $\dot{\bar{\varepsilon}}$ constante, la condition d'instabilité

s'écrit :

$$\frac{d \ln \sigma_0}{d \bar{\varepsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \bar{\varepsilon}} = \gamma = 1 \quad (3)$$

Pour un essai à vitesse d'allongement L constante, soit $L = L_0$ (L de signe la longueur courante de la partie utile de l'échantillon), la vitesse de déformation équivalente décroît au cours du temps suivant la relation.

d'où :

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \dot{L}_0 / [L_0 \exp(\bar{\varepsilon})]$$

$$\frac{d \ln \sigma_0}{d \bar{\varepsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \bar{\varepsilon}} + \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \dot{\bar{\varepsilon}}} \frac{\partial \ln \dot{\bar{\varepsilon}}}{\partial \bar{\varepsilon}} = \gamma - m = 1$$

Avec : m (sans dimension) sensibilité à la vitesse de déformation,

γ (sans dimension) paramètre d'écrouissage.

Dans le cas particulier où la loi d'écrouissage est de type puissance ou loi de Hollomon :

$$\sigma_0 = \sigma_1 (\bar{\varepsilon})^{-n} \text{ , , } \gamma = \frac{n}{\varepsilon} \quad (4)$$

Et par suite le critère de Considère a pour expression :

✓ à $\bar{\varepsilon}$ constante : $\bar{\varepsilon} = n$

✓ à L constante : $\bar{\varepsilon} = \frac{n}{1+m}$

Pour une sensibilité à la vitesse m positive, ce qui est le cas le plus fréquent, la striction se déclenchera donc plus tôt au cours d'un essai à vitesse d'allongement constante

3. Critère de Swift :

On considère maintenant le cas d'une tôle plane soumise à un essai de bi-étirage (Figure suivante). Les seules contraintes non nulles sont σ_1 et σ_2 , toutes deux non nulles, et le comportement du matériau est régi par le critère de plasticité de Von Mises et la loi d'écoulement associée avec écrouissage d'Hollomon.

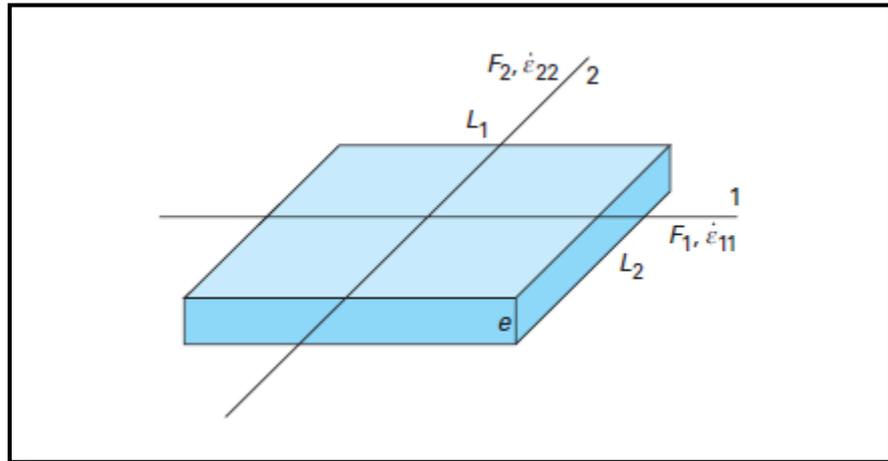


Figure 1: Schéma représentant le modèle d'instabilité de Swift, relatif à une tôle plane soumise à un essai de bi-étirage [18]

Le chemin de chargement de la tôle est défini par :

$$\alpha = \sigma_{22} / \sigma_{11} \quad (5)$$

Supposé constant au cours de l'essai. A l'aide du critère de plasticité on obtient :

$$\sigma_{11} = \sigma_0 (1 - \alpha + \alpha^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Avec σ_0 (Pa) contrainte d'écoulement du matériau. En utilisant la loi d'écoulement, on exprime les vitesses de déformation suivant les deux axes :

Remarquons : au passage, que ces deux relations restent valables si l'on remplace les vitesses de déformation par les déformations, dès lors que α est supposé constant.

Le chemin de déformation est alors défini par le rapport :

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = \frac{2\alpha - \alpha}{2 - \alpha} \quad (7)$$

Qui demeure également constant au cours de l'essai.

En désignant par F_1 et F_2 les forces de traction, le critère de déclenchement de l'instabilité est défini par analogie avec le critère de Considère :

$$\frac{dF_1}{d\varepsilon} = \frac{dF_2}{d\varepsilon} = 0 \quad (8)$$

Avec $\bar{\varepsilon}$ (sans dimension) déformation équivalente du matériau. Ce qui signifie qu'au cours de l'incrément de déformation $d\bar{\varepsilon}$ la force résultante F dans le plan de la tôle ne tourne pas et conserve un module constant. En utilisant les relations $F_1 = \sigma_{11}L_2e$ et $F_2 = \sigma_{22}L_1e$, ou L_1 , L_2 et e désignent respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de la tôle (figure 00), la double égalité entraîne :

$$\frac{d \ln \sigma_a}{d\bar{\varepsilon}} = \gamma = f(\alpha) = g(\lambda) \quad (9)$$

$$f(\alpha) = \frac{4 - 3\alpha - 3\alpha^2 + 4\alpha^3}{4(1 - \alpha + \alpha^2)^{3/2}} \quad (10)$$

et

$$f(\lambda) = \sqrt{3} \frac{2 + \lambda - 3\lambda^2 + 2\lambda^3}{4(1 - \lambda + \lambda^2)^{3/2}} \quad (11)$$

Pour un matériau apte à s'écrouir suivant la loi de Hollomon, on déduit que la striction s'amorce pour :

Cette courbe est symétrique par rapport à la première bissectrice (changement de α en $1/\alpha$, ou de λ en $1/\lambda$), ce qui résulte de l'hypothèse d'isotropie adoptée dans ce modèle simple.

On notera les trois trajets de chargement particuliers :

– la traction uniaxiale suivant la direction 1 ($\alpha = 0, \lambda = -1/2$), telle que $\varepsilon_{11} = n, \varepsilon_{22} = -n/2, \varepsilon_{33} = n$. On retrouve le résultat de Considère ;

– la traction plane suivant la direction 1 ($\alpha = 1/2, \lambda = 0$). Dans ce cas $\varepsilon_{11} = n, \varepsilon_{22} = 0, \varepsilon_{33} = 2n/\sqrt{2}$

– la traction équi-biaxiale ($\alpha = 1, \lambda = 1$), correspondant à $\varepsilon_{11} = n, \varepsilon_{22} = n, \varepsilon_{33} = 2n$.

Un tel diagramme permet de prévoir l'apparition d'une striction au cours du formage d'une tôle, sous la réserve que le chargement de celle-ci soit radial, c'est-à-dire α et λ constants. [18]

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{2-\alpha}{2(1-\alpha+\alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{2\alpha-1}{2(1-\alpha+\alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{n}{f} \quad \text{Où } f(\alpha) = \frac{4-3\alpha-3\alpha^2+4\alpha^3}{4(1-\alpha+\alpha^2)^{3/2}} : \text{ Fonction des contraintes}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (17)$$

$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$; En utilisant la formule 15 et 16, on obtient :

$$\dot{\varepsilon}_3 = -\frac{1+\alpha}{2(1-\alpha+\alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \bar{\varepsilon} \quad (18)$$

On propose d'étudier l'influence du rapport σ_2/σ_1 sur l'amincissement de la tôle étudiée.

On pose $\sigma_1 = \sigma_0$ donnée par la loi d'écroutissage d'Hollomon identifiée expérimentalement.

On distingue trois cas : traction plane, compression plane et traction-compression.

Cas 01 : $\sigma_1 > 0$ et $\sigma_2 > 0$

. Il est proposé dans ce qui suit d'étudier l'influence du rapport entre ces deux contraintes sur l'évolution de l'épaisseur.

L'approche utilisée s'appuie sur le critère de Swift.

. On propose aussi d'étudier le comportement de deux tôles, la première ayant pour épaisseur initiale 2 mm, et la seconde, celle qui correspond à la le XES laminée au LAF ayant une épaisseur de 0,8mm. Dans cette étude, il est proposé d'étudier les trois cas retrouvés en emboutissage.

Le cas un où l'amincissement est évident, il est obtenu pour un état de contrainte de traction

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{bmatrix}$$

$$\sigma_1 > 0, \quad \sigma_2 > 0 \Rightarrow \quad \varepsilon_3 < 0 \text{ et donc amincissement}$$

Le cas 2 donne à coup un épaissement car σ_1 et σ_2 sont compressifs c'est-à-dire négatives.

Le cas trois peut donner un épaissement ou un amincissement en fonction du rapport

$$\text{donné par } \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}.$$

On propose d'étudier l'emboutissabilité dans ce cas en fonction des paramètres d'écrouissage

A et n suivants et en fonction de la d'écoulement en la posant constante :

Cas 01 : Epaisseur initiale=2mm.

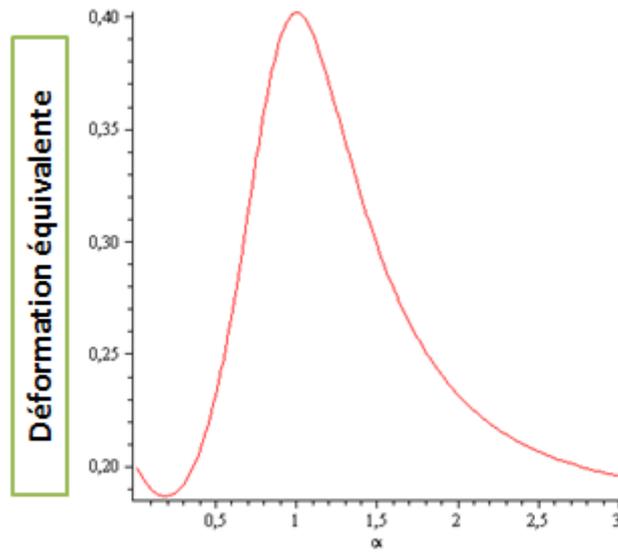


Figure 3 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

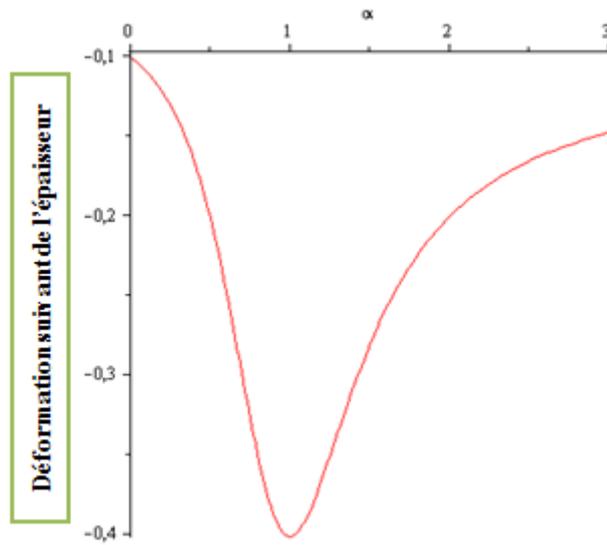


Figure 4 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

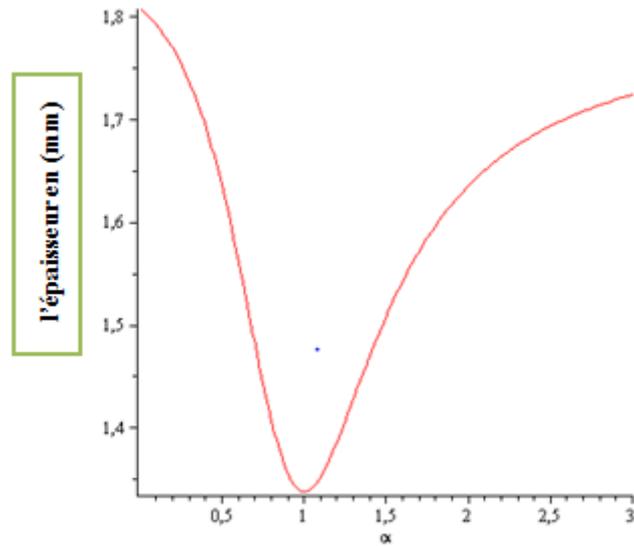


Figure 5 : Epaisseur de début de striction

Cas 01 : Epaisseur initiale=0.8mm.

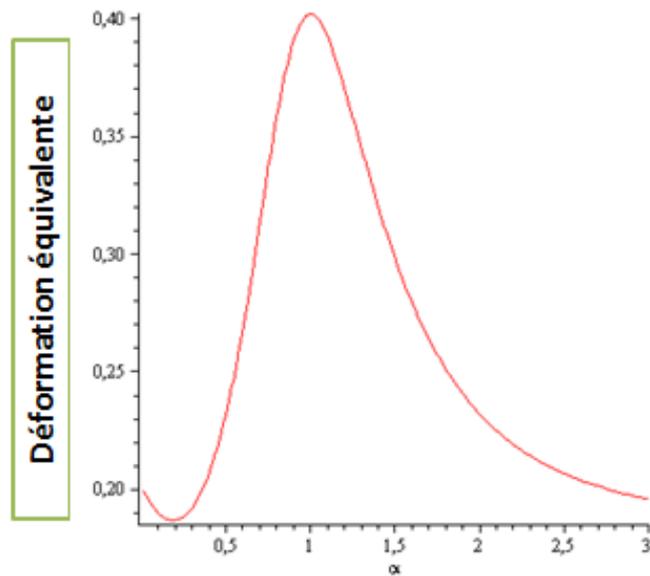


Figure 6 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

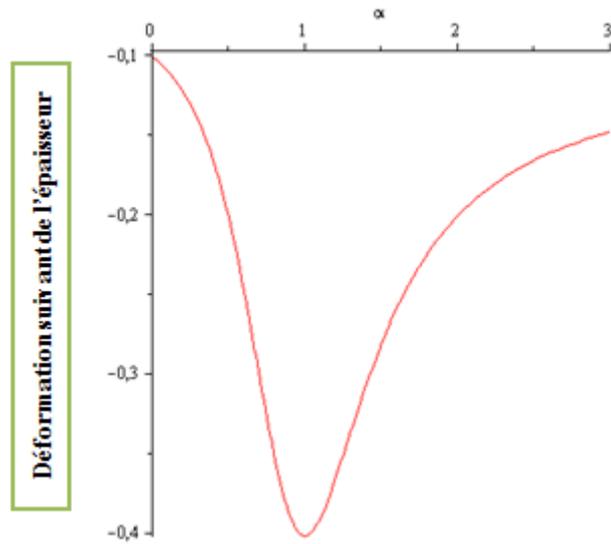


Figure 7 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

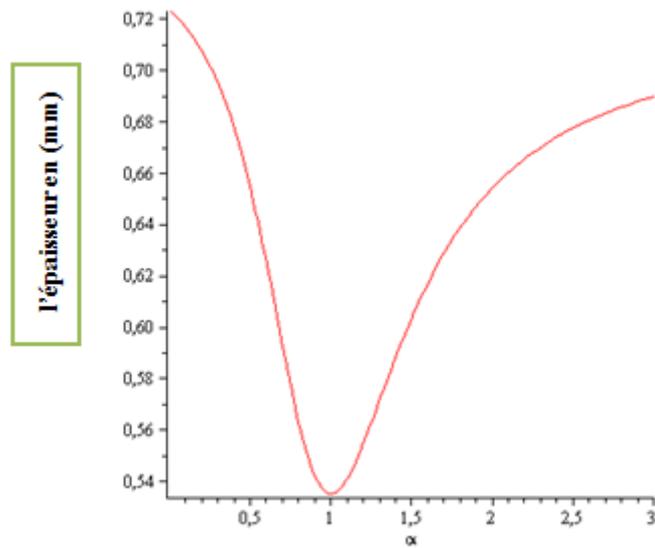


Figure 8 : Epaisseur de début de striction

Influence du coefficient d'écroutissage n :

n=0.15

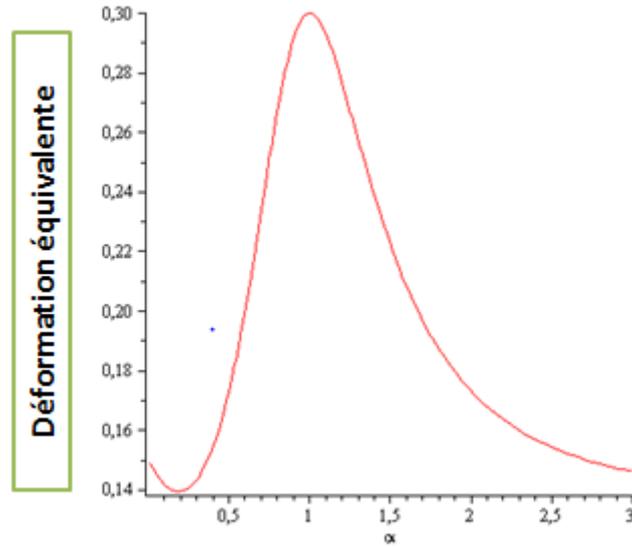


Figure 9 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

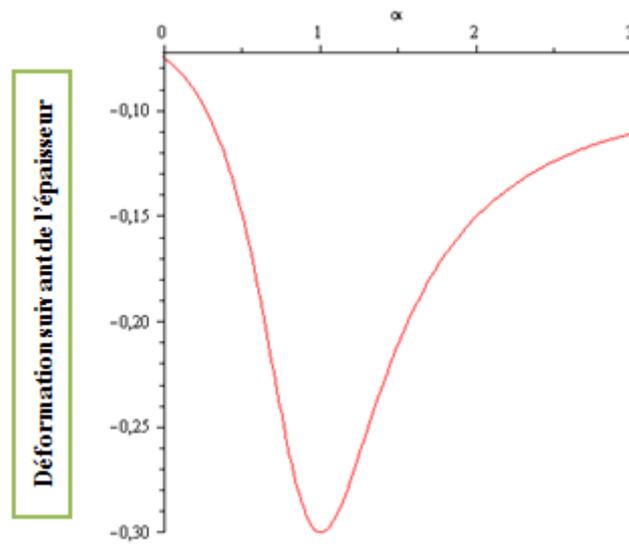


Figure 10 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

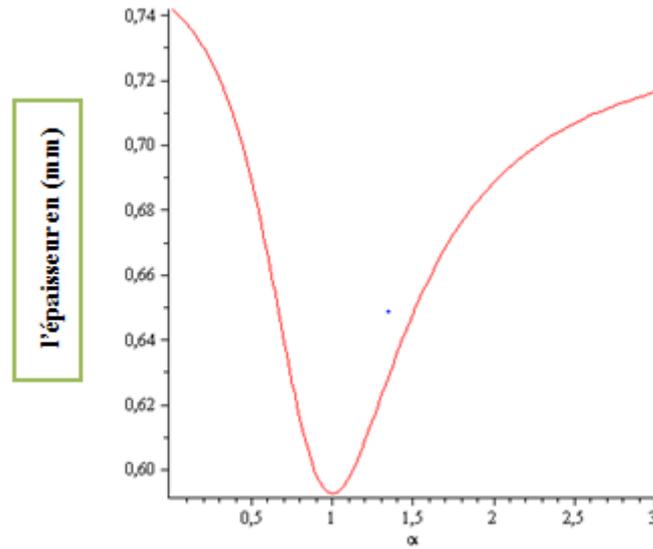


Figure 11 : Epaisseur de début de striction

n=0.25

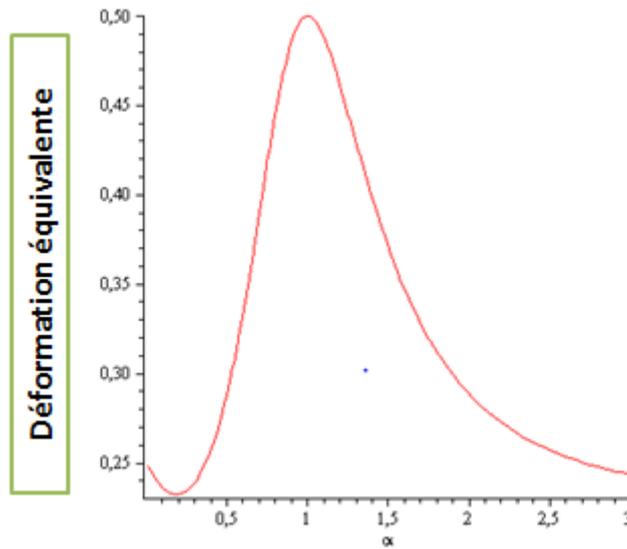


Figure 12 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

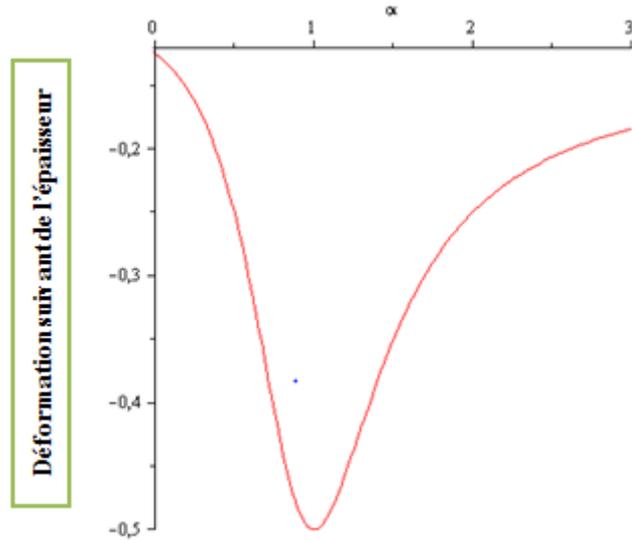


Figure 13 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

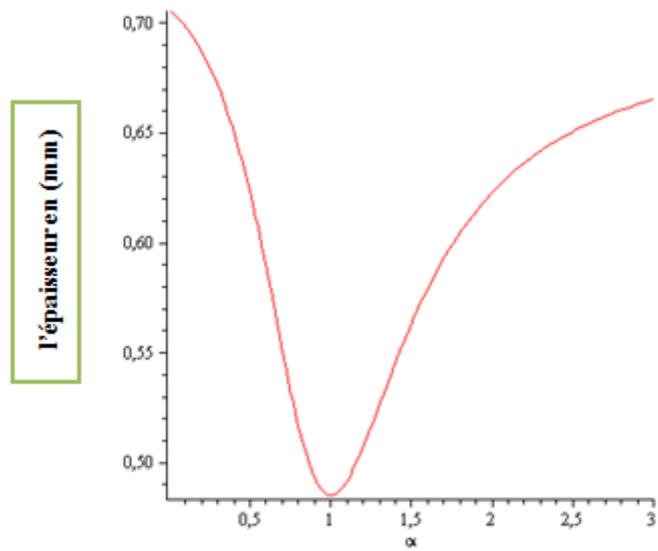


Figure 14 : Epaisseur de début de striction

- Influence de la contrainte d'écoulement. Contrainte d'écoulement constante
- $A=200$ GPa

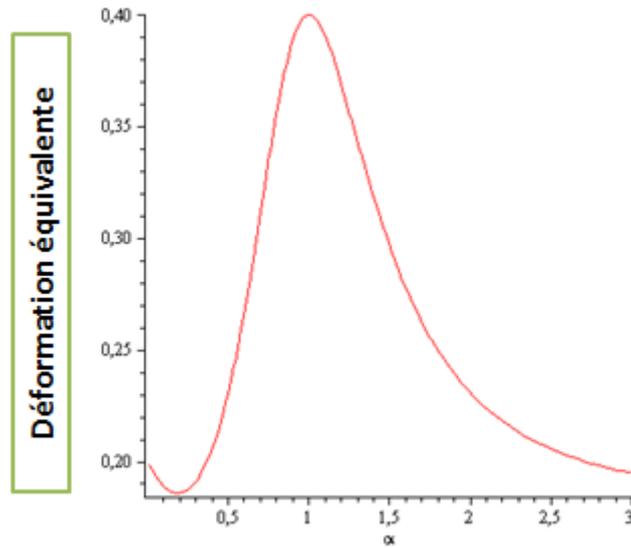


Figure 15 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

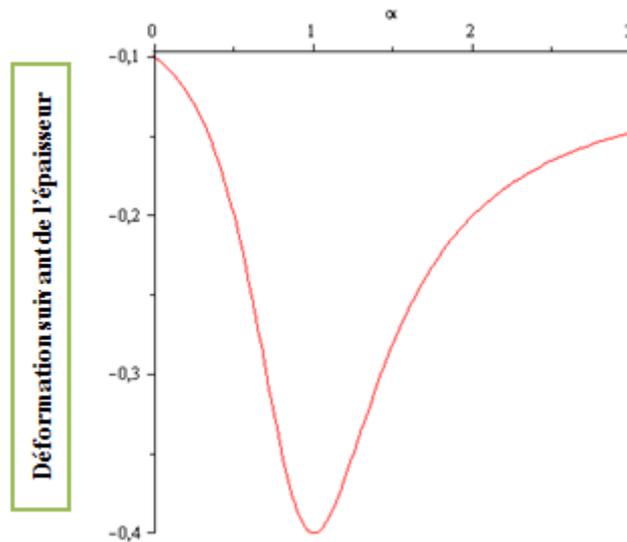


Figure 16 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

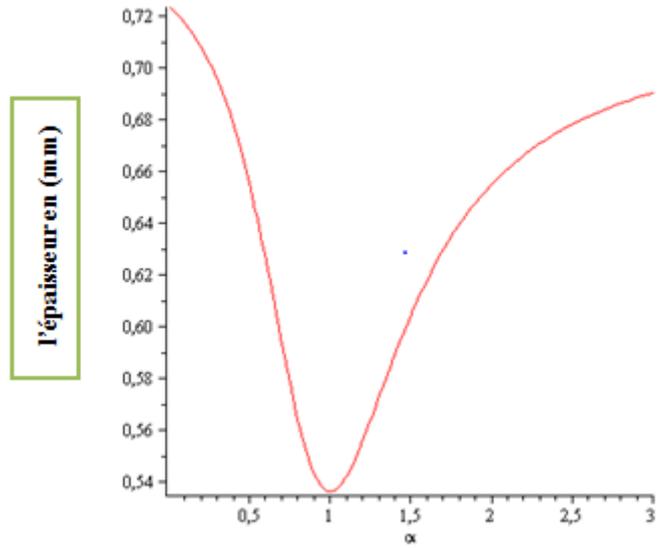


Figure 17 : Epaisseur de début de striction

A=600.

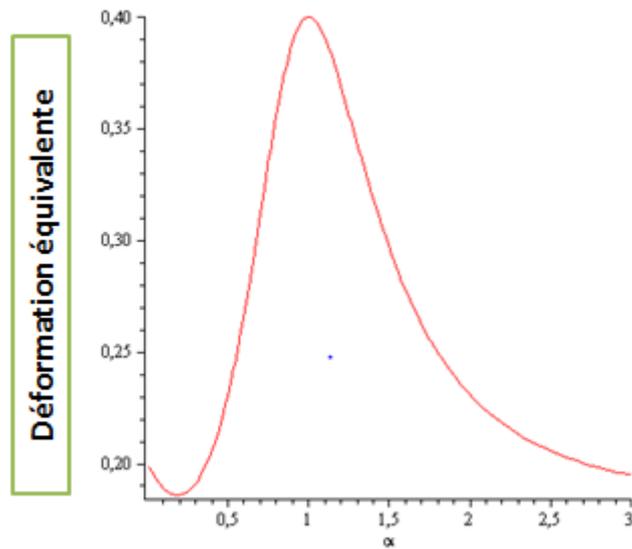


Figure18 : Déformation équivalente tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

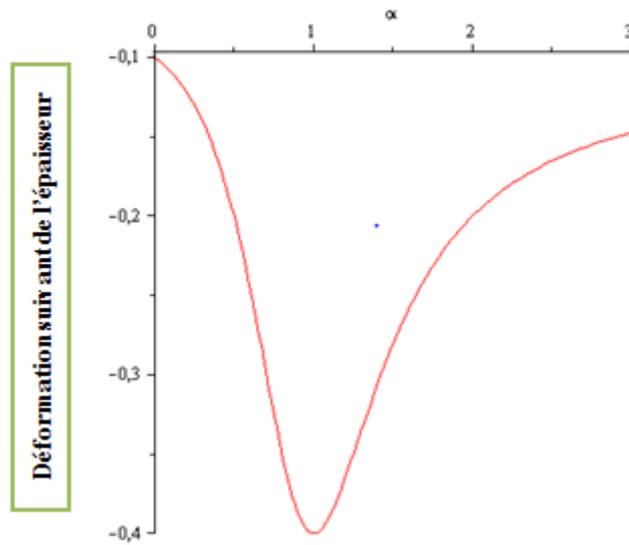


Figure 19 : Déformation suivant l'épaisseur tolérée en fonction du rapport $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

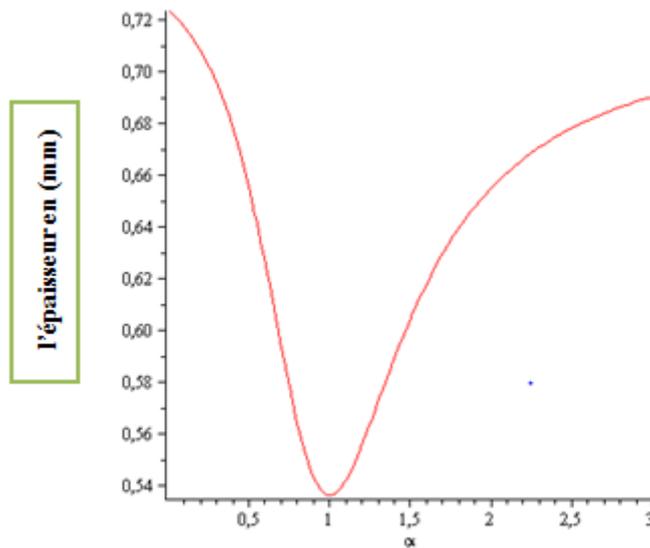


Figure 20 : Epaisseur de début de striction

Conclusion : Les résultats obtenus montrent que l'emboutissabilité est maximale pour α égal à un.

Nous proposons d'évaluer la sensibilité de l'emboutissabilité à l'anisotropie. Pour cela, il est nécessaire de modéliser ce cas.

4. Modélisation simplifiée de l'emboutissage au cas où $\alpha=1$ (Expansion équibiaxée)

Il est proposé de réaliser ce modèle dans trois cas, le cas le plus simple est donné par la plasticité de Von-Misés (isotropie complète), le cas orthotrope (qui est l'anisotropie la plus général) et le cas intermédiaire donné par l'isotropie transverse.

Les tenseurs des contraintes et de déformations se présentant comme suit :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

La résolution du problème consiste à calculer $\sigma_1, \sigma_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ et ε_3

L'emboutissage équibiaxée donne $\sigma_1 = \sigma_2$

4.1 Cadre isotrope

Critère de plasticité de Von mises (matériau isotrope complet)

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_1)^2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$$

Loi d'évolution :

$$\left(\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \right)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\lambda}{2\sigma} [2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3] = \frac{\lambda}{2\sigma} [2\sigma_1 - \sigma_2]$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\lambda}{2\sigma} [2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3] = \frac{\lambda}{2\sigma} [2\sigma_2 - \sigma_1]$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_2 \Rightarrow 2\sigma_1 - \sigma_2 = 2\sigma_2 - \sigma_1 \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_2$$

On reporte $\sigma_1 = \sigma_2$ dans (1) \Rightarrow

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1^2 - \sigma_1^2} = |\sigma_1|$$

$$\bar{\sigma} = |\sigma_1| = |\sigma_2|$$

Calcul de $\bar{\varepsilon}$

$$\text{Von mises} \Rightarrow \bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}}} = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \text{ et } \varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{2\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2}} \quad ; \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 \Rightarrow \varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_3}{2}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\left(-\frac{\varepsilon_3}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\varepsilon_3}{2}\right)^2 + \frac{6}{4} \varepsilon_3^2}}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\frac{6}{4} \varepsilon_3^2}} = |\varepsilon_3|$$

$$\bar{\varepsilon} = |\varepsilon_3|$$

On applique le critère de plasticité $\Rightarrow \bar{\sigma} = \sigma_0$

$$\bar{\sigma} = |\sigma_1| \text{ et } \bar{\varepsilon} = |\varepsilon_3|$$

$$|\sigma_1| = \sigma_0$$

Plasticité sans écrouissage : $\sigma_0 = \text{cte} \Rightarrow |\sigma_1| = \sigma_0 = 0$

Plasticité avec écrouissage : Hollomon $\bar{\sigma} = |\sigma_1| = \sigma_0 = A\bar{\varepsilon}^n$

$$|\sigma_1| = A|\varepsilon_3|^n : \varepsilon_3 = \ln \frac{e}{e_0}$$

Conclusion : pour calculer σ_1 et σ_2 ($\sigma_1 = \sigma_2$) on doit identifier A et n.

La modélisation sous Mapple donne :

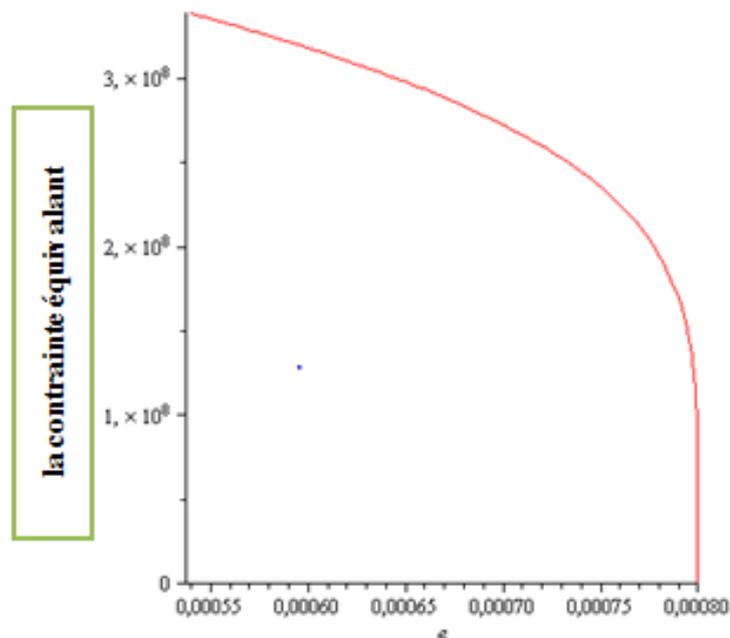


Figure 21 : évolution de la contrainte équivalente en fonction de l'épaisseur

4.2 Cadre isotrope transverse

Critère de plasticité de Hill dans le cadre isotrope transverse donne :

$$\bar{\sigma} = \left\{ \left\{ H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + G[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \right\} \right\}^{1/2} = \sigma_0$$

$$\bar{\sigma} = \{H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + G[(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)]\}^{1/2}$$

Traction simple suivant la direction du laminage permet d'écrire :

$$\bar{\sigma} = \{H\sigma_1^2 + G\sigma_1^2\}^{1/2} = \sigma_0$$

On posant : $G+H = 1 \Rightarrow \bar{\sigma} = |\sigma_1| = \sigma_0$

Cela permettra de prendre en compte la loi d'écouissage suivant la direction de laminage.

Le calcul de la contrainte équivalente donne :

On calcule les coefficients d'anisotropie G et H en fonction de r (coefficient de Lankford,

$$r = \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_3}), \text{ où } r = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

r_0 , r_{45} et r_{90} sont respectivement les coefficients de Lankford suivant les directions de laminage, à 45 degrés par rapport à cette direction et suivant la direction transversale.

On trouve :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2r}{1+r}\sigma_1\sigma_2}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2r}{1+r}\sigma_1\sigma_2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1^2 - \frac{2r}{1+r}\sigma_1^2}$$

$$\bar{\sigma} = |\sigma_1| \sqrt{2 - \frac{2r}{1+r}} = |\sigma_1| \sqrt{\frac{2(1+r) - 2r}{1+r}} = |\sigma_1| \sqrt{\frac{2+2r-2r}{1+r}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{1+r}} |\sigma_1|$$

si : $r = 1$ (matériau isotrope) $\Rightarrow \bar{\sigma} = |\sigma_1|$

Calcul de $\bar{\varepsilon}$:

$$\bar{\varepsilon} = \left\{ \frac{(1+r)}{1+2r} [(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) + 2r\varepsilon_1\varepsilon_2] \right\}^{1/2}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \Rightarrow \bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1+r}{1+2r}} \sqrt{(1+r)(2\varepsilon_1^2) + 2r\varepsilon_1^2}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1+r}{1+2r}} \sqrt{2\varepsilon_1^2(2r+1)}$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2} \Rightarrow \varepsilon_1 = -2\varepsilon_3$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1+r}{1+2r}} \sqrt{2 \frac{(-\varepsilon_3)^2}{4} (1+2r)}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1+r}{1+2r}} \sqrt{-\frac{\varepsilon_3^2}{2}} = \frac{\sqrt{1+r}}{\sqrt{2}} |\varepsilon_3|$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1+r}{2}} |\varepsilon_3|$$

Critère de plasticité $\bar{\sigma} = \sigma_0$

Ecrouissage d'Hollomon : $\sigma_0 = A\bar{\varepsilon}^n$

$$\Rightarrow \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{1+r}} |\sigma_1| = A \left(\sqrt{\frac{1+r}{2}} |\varepsilon_3| \right)^n$$

$$\sigma_1 = A \left(\sqrt{\frac{1+r}{2}} \right)^{n+2} |\varepsilon_3|^n$$

Résultat : pour connaître $\sigma_1 = \sigma_2$, il faut connaître A et n et r.

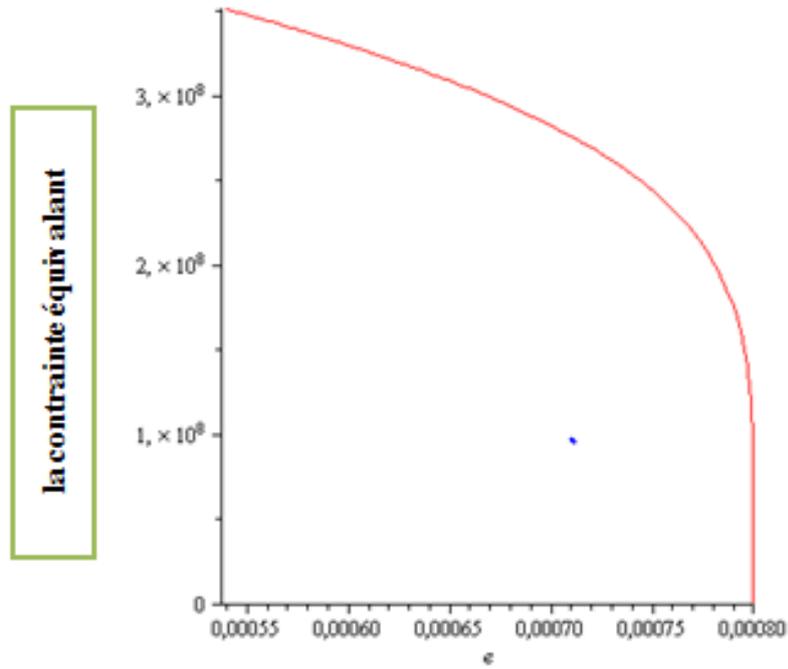


Figure 22 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur

Evaluation de la sensibilité des résultats à l'anisotropie :

$r=1.2$

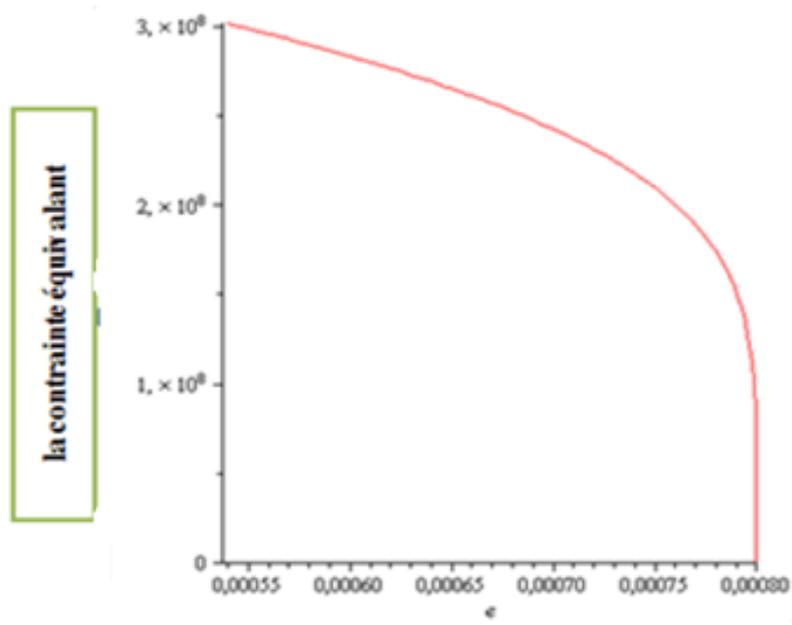


Figure 23 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs ($r=0.8$)

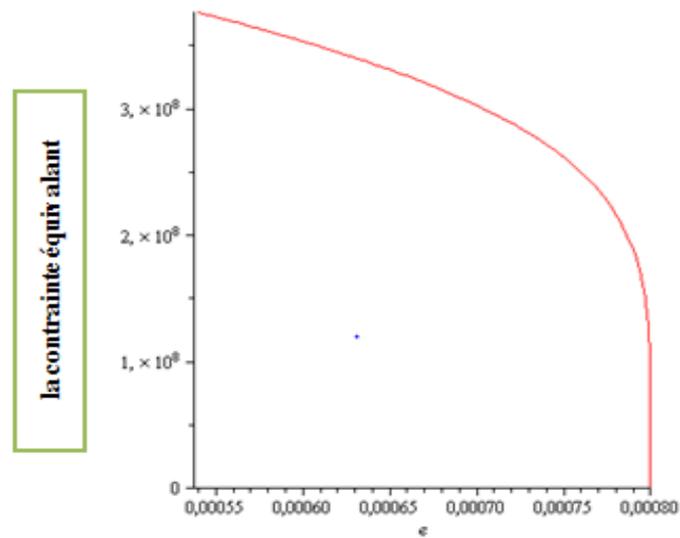


Figure 24 : évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs ($r=1.2$)

Comparaison d'évolution des contraintes en fonction des épaisseurs ($r=1.2$ et $r=0.8$)

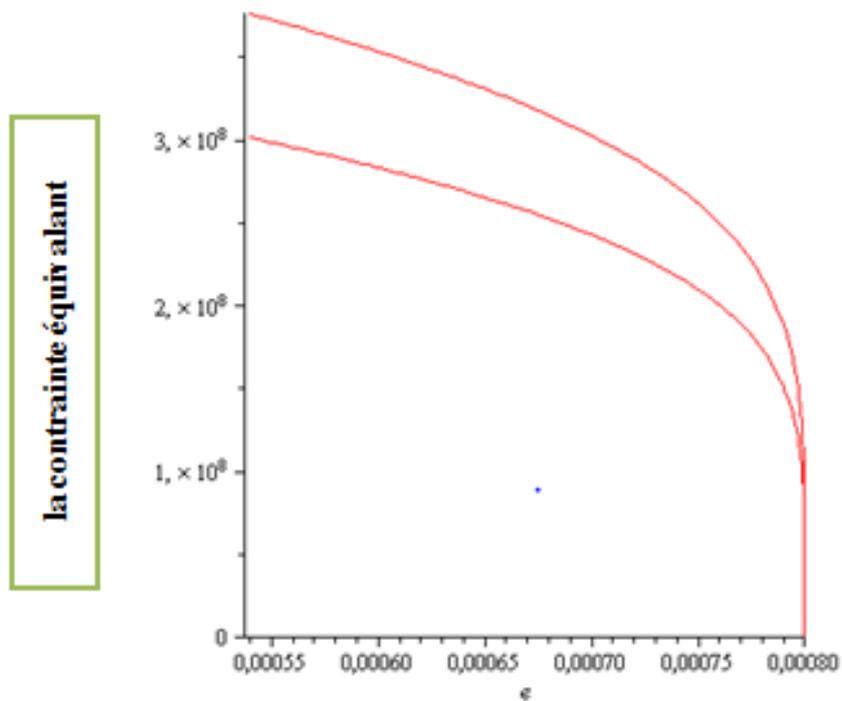


Figure 25 : Comparaison d'évolution de la contrainte en fonction de l'épaisseur épaisseurs ($r=0.8$; $r=1.2$)

On conclut que si l'anisotropie est plus forte, les contraintes sont plus intenses

4.3 Cadre orthotrope

Hill a proposé en 1948 un critère de plasticité anisotrope pour généraliser celui de von Mises

$$\sigma = \sqrt{H_{ijkl} \sigma_{kl} \sigma_{ij}}$$

Où H_{ijkl} est le tenseur d'anisotropie de Hill.

L'anisotropie plastique est évaluée grâce au coefficient d'anisotropie (coefficient de lanckford) :

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{e}{e_0}\right)} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$$

Dans le cas orthotrope et en supposant le critère insensible à la pression hydrostatique on obtient le critère classique de Hill qui lorsque le tenseur des contraintes est diagonal dans le repère d'orthotrope (ce qui sera en première approximation le cas du laminage) s'écrira comme suit:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2}$$

Elle fait intervenir trois coefficients F, G et H qui en fait n'interviennent que par leur rapport

$$\frac{H}{G} \text{ et } \frac{H}{F}.$$

En normant les constantes de manière à ce que la contrainte équivalente coïncide avec la contrainte appliquée dans un essai en traction simple suivant la direction de laminage, en

posant $r_1 = \frac{H}{G}$ et $r_2 = \frac{H}{F}$ et en choisissant $G + H = 1$ on peut écrire :

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{r_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + r_1(\sigma_1 - \sigma_2)^2}$$

En contraintes planes,

$$\bar{\sigma} = |\sigma_1| \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{\alpha \frac{r_1}{r_2} - 2r_1\alpha + r_1\alpha^2 + r_1 + 1}$$

$$\sigma_3 = 0 \Rightarrow \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{\frac{r_1}{r_2} \sigma_2^2 + \sigma_1^2 + r_1 \sigma_2^2 + r_1 \sigma_1^2 - 2r_1 \sigma_1 \sigma_2}$$

$$\Rightarrow \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{\sigma_1^2 (1+r_1) + \sigma_2^2 \left(\frac{r_1}{r_2} + r_1\right) - 2r_1 \sigma_1 \sigma_2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{\frac{r_1}{r_2} \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_1^2 - 2\sigma_3 \sigma_1 + r_1 \sigma_1^2 + r_1 \sigma_2^2 - 2r_1 \sigma_1 \sigma_2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \sqrt{\sigma_1^2 (1+r_1) + \sigma_2^2 \left(\frac{r_1}{r_2} + r_1\right) - 2r_1 \sigma_1 \sigma_2}$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} = \lambda \frac{1}{\sqrt{1+r_1}} \cdot \frac{2\sigma_1 + 2r_1 \sigma_1 - 2r_1 \sigma_2}{2\sqrt{\quad}} = \lambda \cdot \frac{\sigma_1 + r_1(\sigma_1 - \sigma_2)}{\bar{\sigma}}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = \frac{\lambda}{\sqrt{1+r_1}} \cdot \frac{2\sigma_2 \left(\frac{r_1}{r_2} + r_1\right) - 2r_1 \sigma_1}{2\sqrt{\quad}}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\lambda}{1+r_1} \cdot \frac{\sigma_2 \frac{r_1}{r_2} + \sigma_2 r_1 - r_1(\sigma_1)}{\bar{\sigma}}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\lambda}{\bar{\sigma}} \frac{1}{1+r_1} \frac{\sigma_2 \frac{r_1}{r_2} + r_1(\sigma_2 \sigma_1)}{\bar{\sigma}}$$

$$\text{Si } \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon}_3 \Rightarrow \sigma_2 \frac{r_1}{r_2} + r_1(\sigma_2 - \sigma_1) = \sigma_1 + r_1(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\text{Remarque : } \sqrt{\quad} = \sqrt{\sigma_1^2 (1+r_1) + \sigma_2^2 \left(\frac{r_1}{r_2} + r_1\right) - 2r_1 \sigma_1 \sigma_2}$$

Chapitre IV :
Simulation Numérique
de l'emboutissage du
bac de la brouette

1. Introduction :

La simulation numérique par éléments finis reste l'outil le plus puissant pour prédire les grandeurs mécaniques (contraintes et vitesses) en mise en forme. Il est proposé dans ce travail de simuler l'emboutissage du bac dans les conditions réelles sous Abaqus.

Pour cela, cette simulation utilise le plan de la presse à Ferrovial (figure 1 et/ou 2) et les données du comportement du matériau tirées du travail expérimental présentée au second chapitre dans le cadre de la plasticité de Von-Misés avec écrouissage d'Hollomon.

Pour la loi d'Hollomon, $A=408.8\text{MPa}$, le coefficient d'écrouissage $n=0.201$.

Coefficient de frottement = 0,1

Deux simulations ont été réalisées. La première a pour objectif de déterminer la zone de rupture et la seconde pour évaluer l'influence de la force de serrage sur la possibilité d'éliminer la rupture.

Les résultats de cette simulation sont présentés dans les figures suivant :

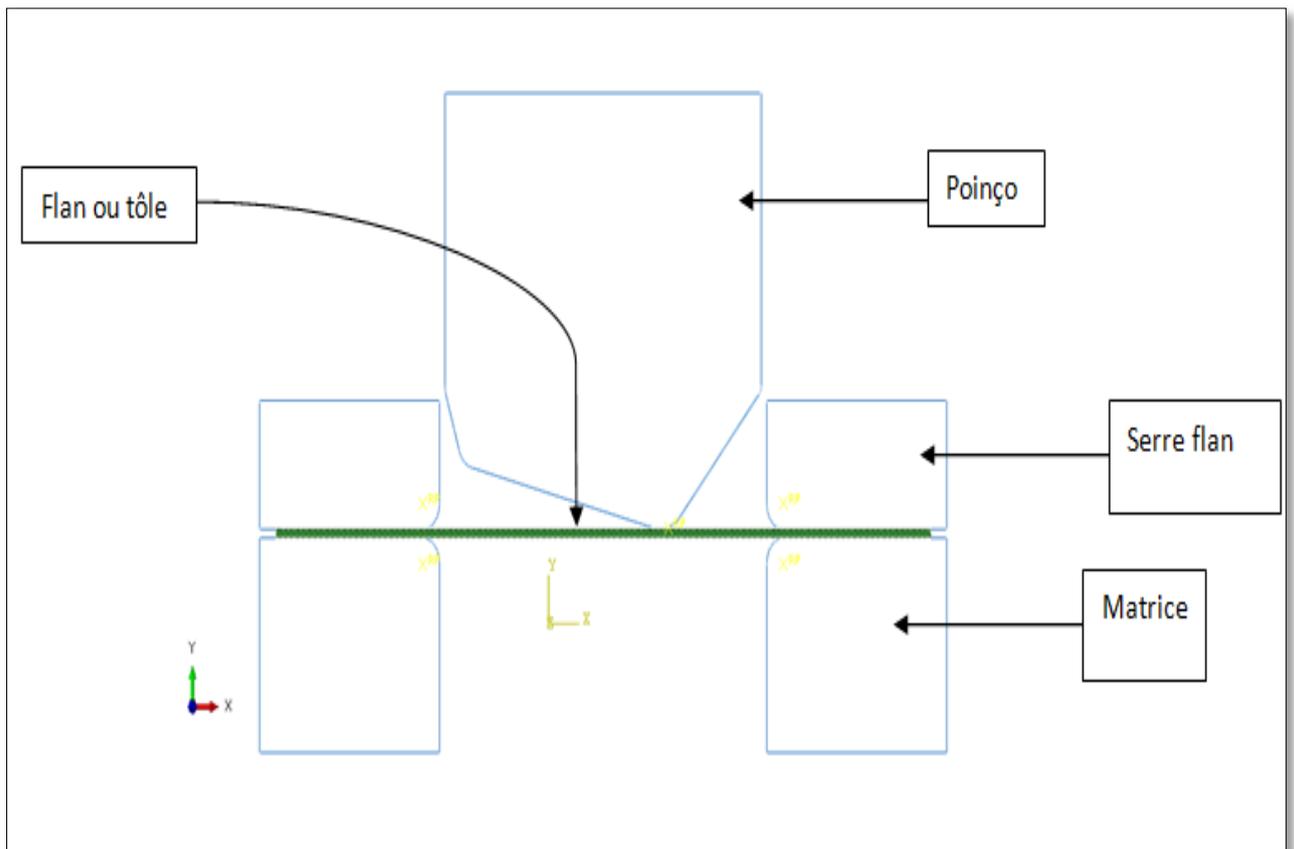


Figure1 : montre la forme et les Composants de presse d'emboutissage

2. Détermination de la zone de rupture

2. a Simulation d'opération d'emboutissage

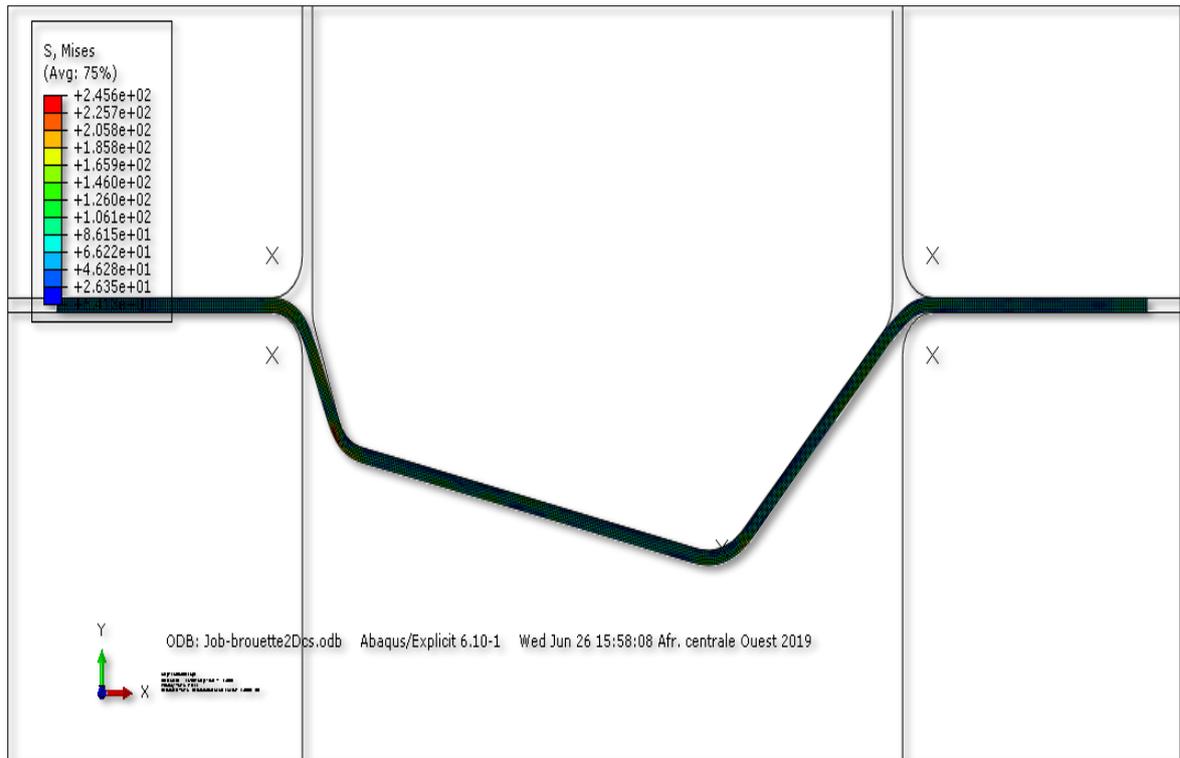


Figure2 :montre comment se passe d'opération d'emboutissage

2.b Simulation de la striction

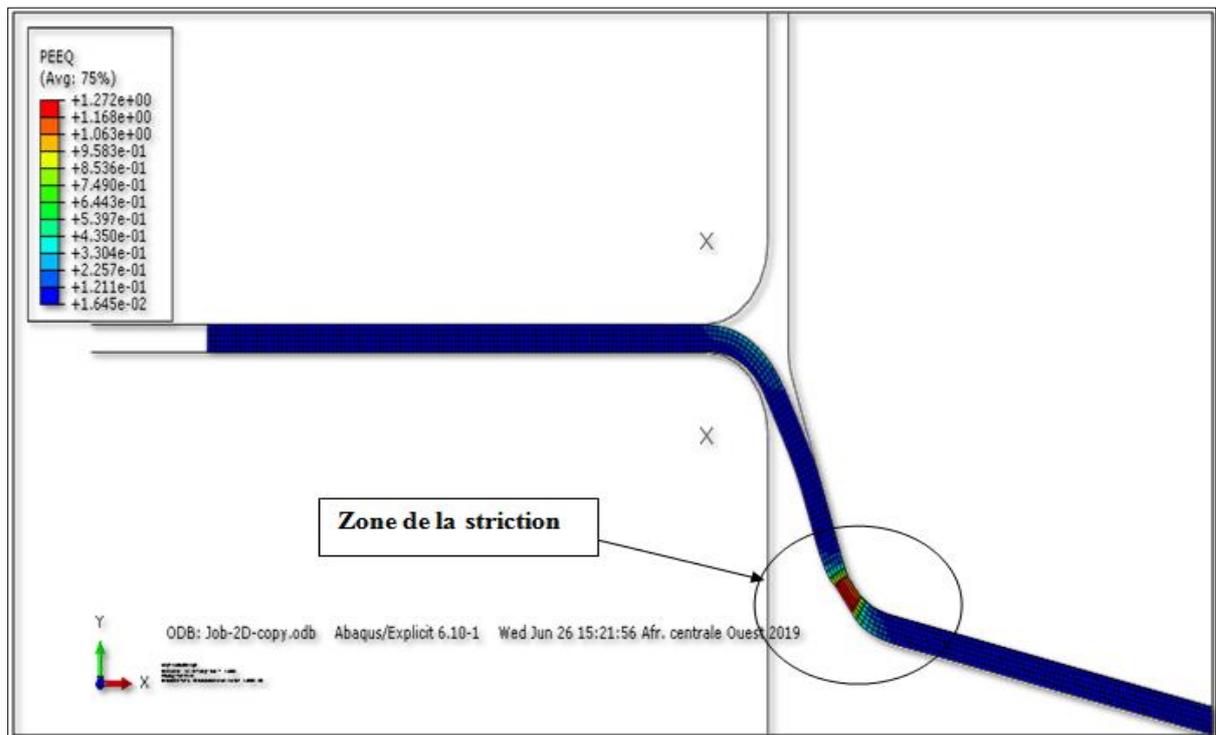


Figure 3: Simulation de la striction avec les valeurs ϵ équivalent



Figure 4: Simulation de la striction avec les valeurs $\bar{\sigma}$

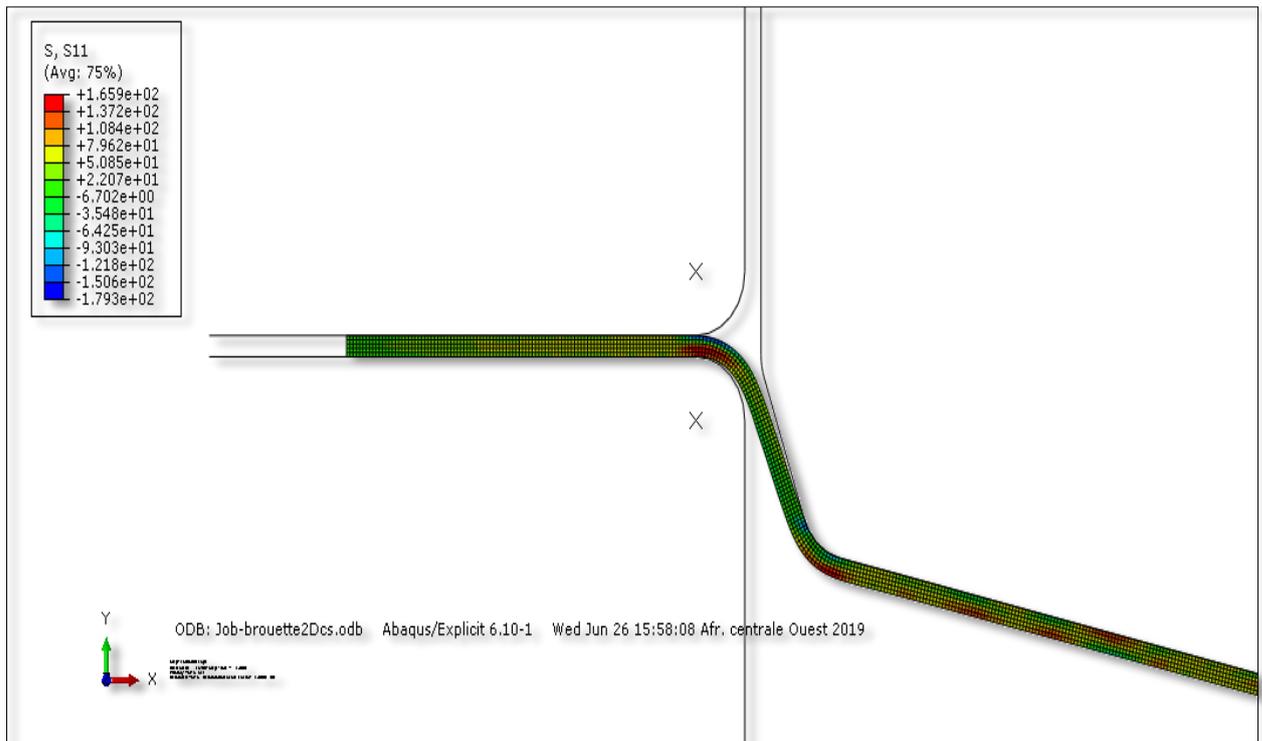


Figure 5: Simulation de la striction avec les valeurs σ_{11}

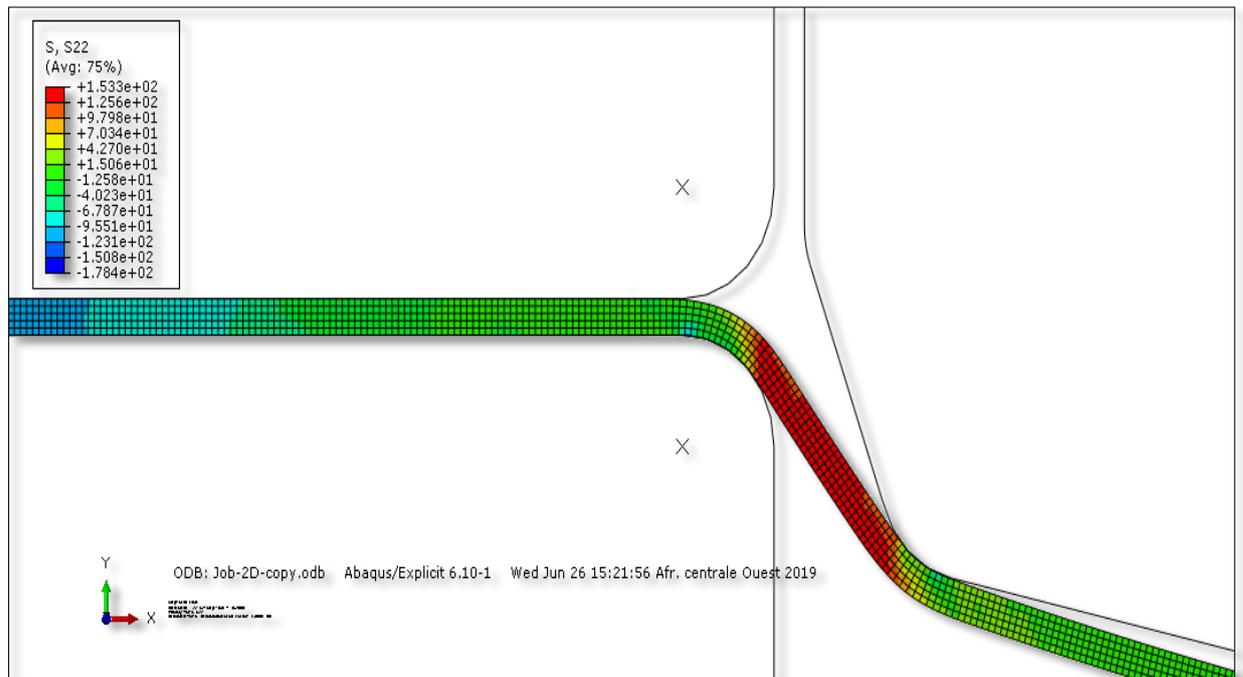


Figure 6: Simulation de la striction avec les valeurs σ_{22}

L'analyse des résultats donnés par la simulation montre que l'amincissement excessif et donc la rupture se déroule dans la zone de cisaillement comme présenté dans la figure présentée ci-dessus. Dans cette zone, la simulation donne un rapport entre les deux contraintes égale à 2.

3. Influence de la force de serrage

Dans la figure présentée ci-dessus où nous avons striction, l'effort de serrage est égale à 300 N. Il Est proposé dans ce qui suit un effort de serrage moins important, égale à 150 N.

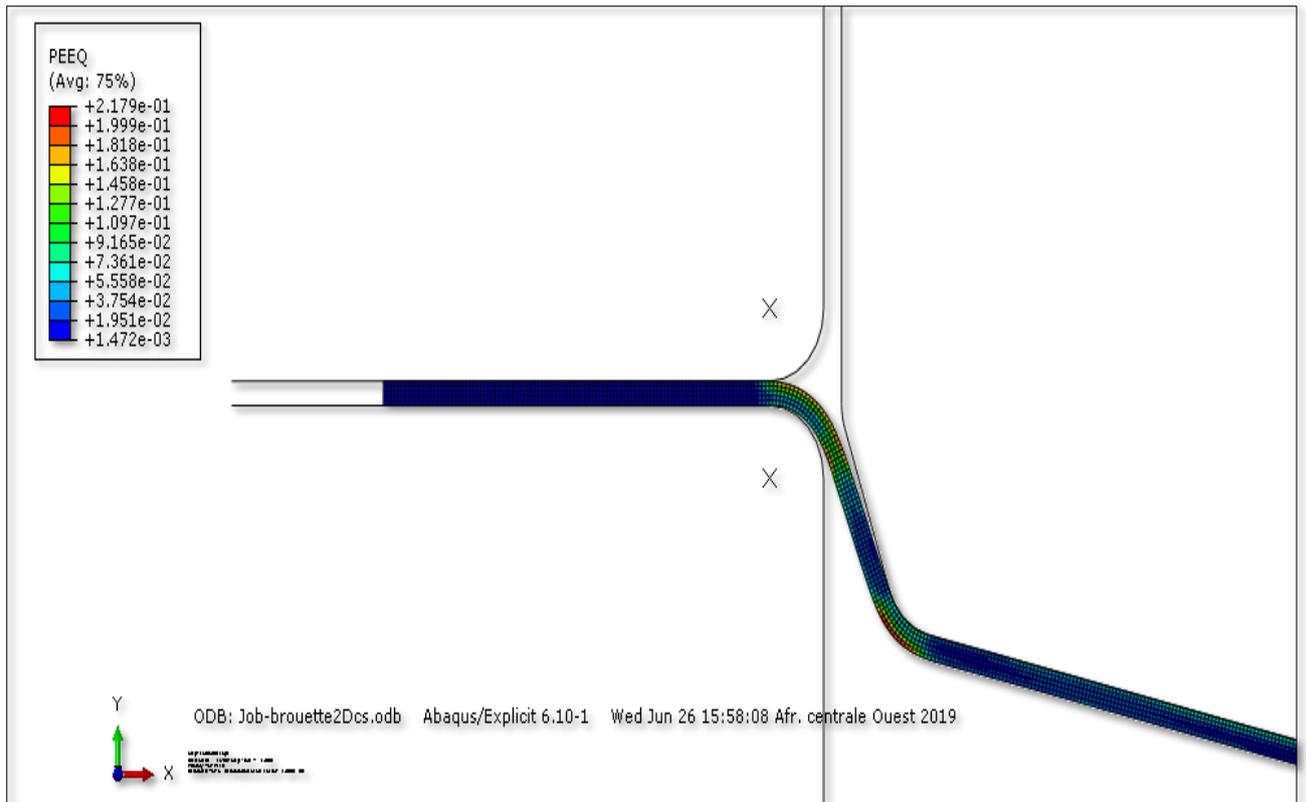


Figure 7: Simulation sans striction avec les valeurs ε équivalent

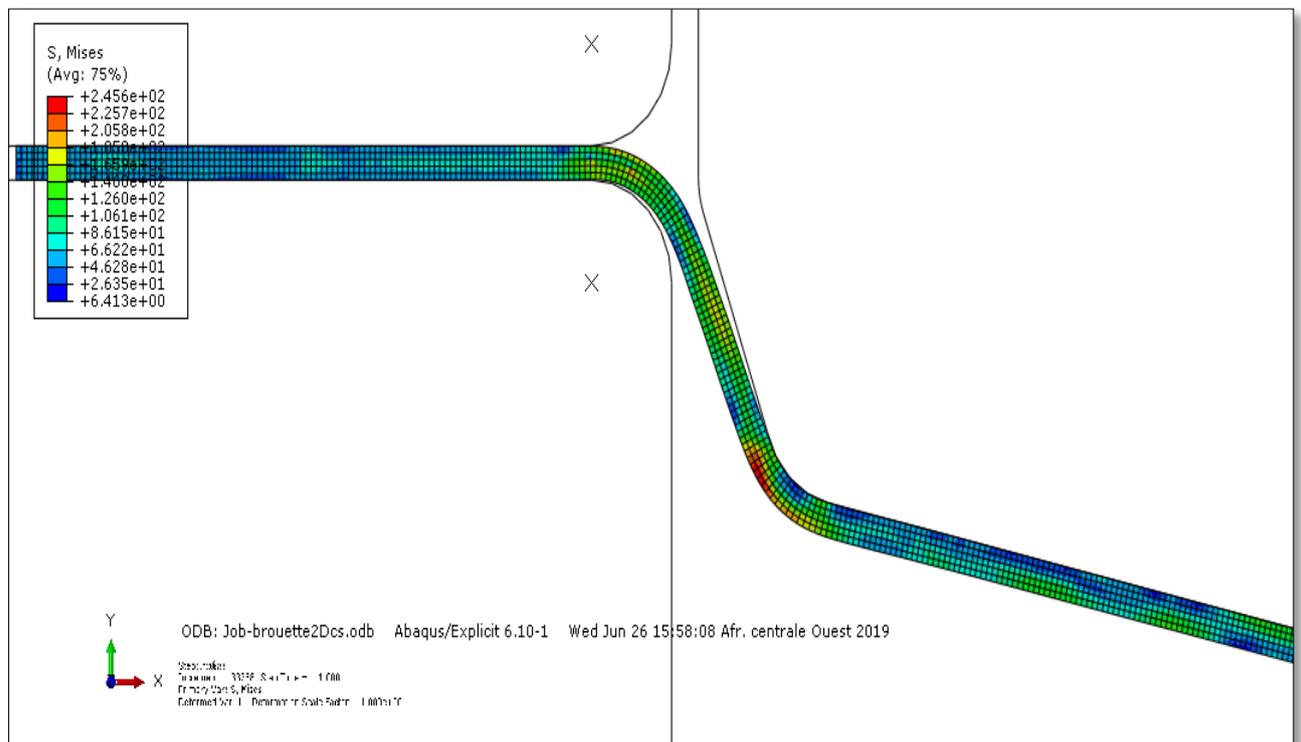


Figure 8: Simulation sans striction avec les valeurs $\bar{\sigma}$

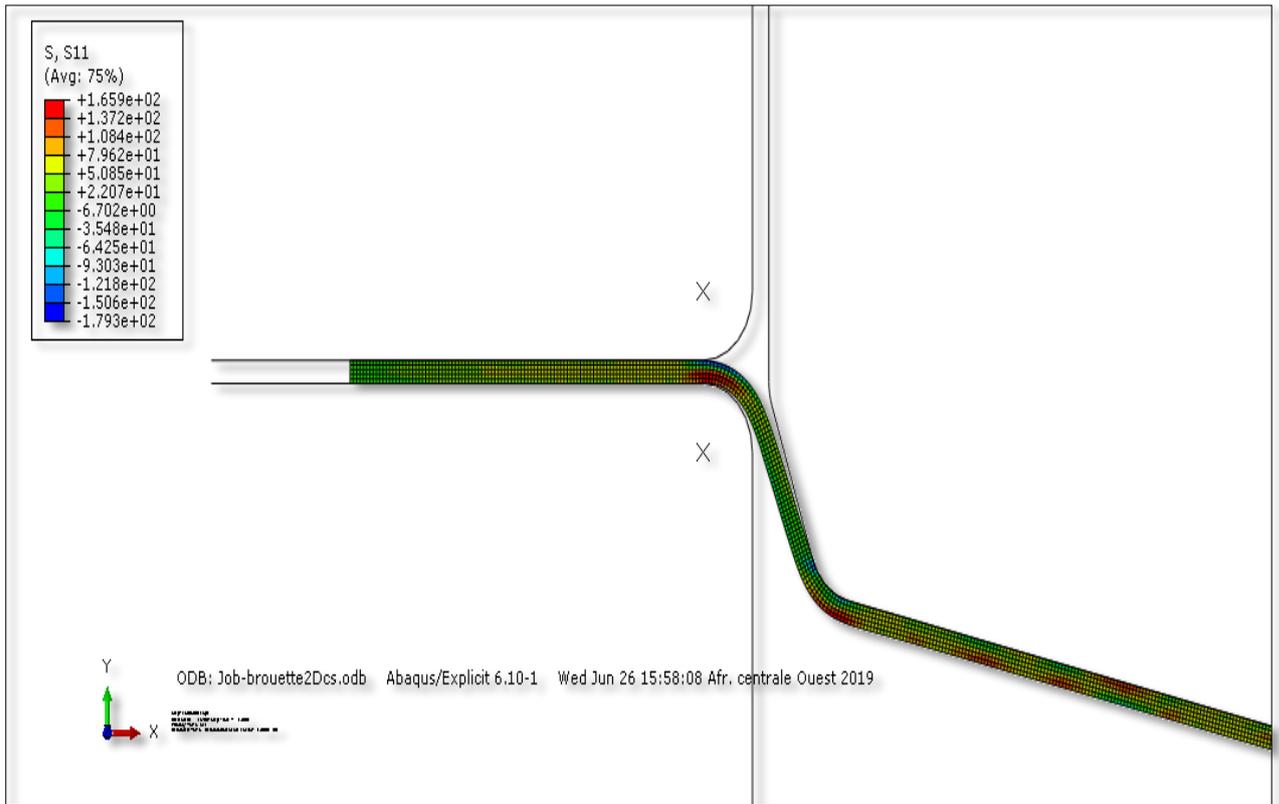


Figure 9: Simulation sans striction avec les valeurs σ_{11}

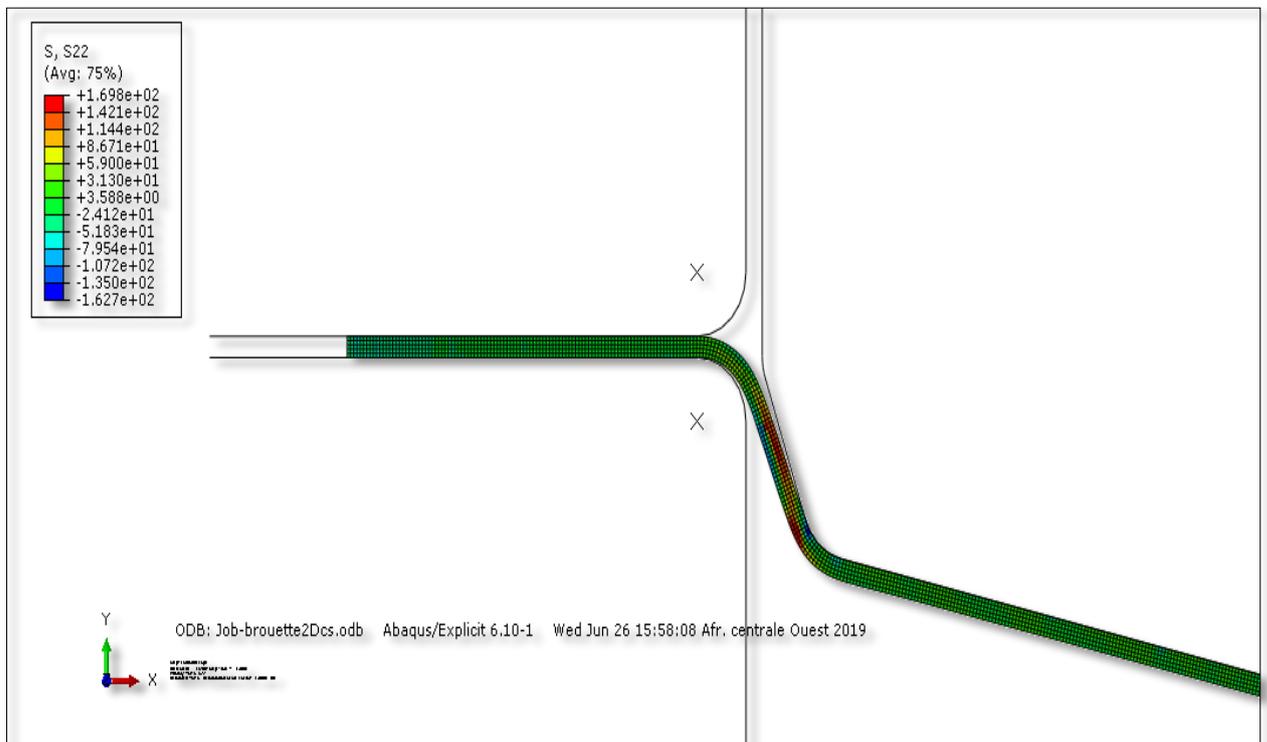


Figure 10: Simulation sans striction avec les valeurs σ_{22}

On constate dans ce cas, que l'augmentation de l'effort de serrage favorise l'amincissement excessif.

4. La comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle analytique

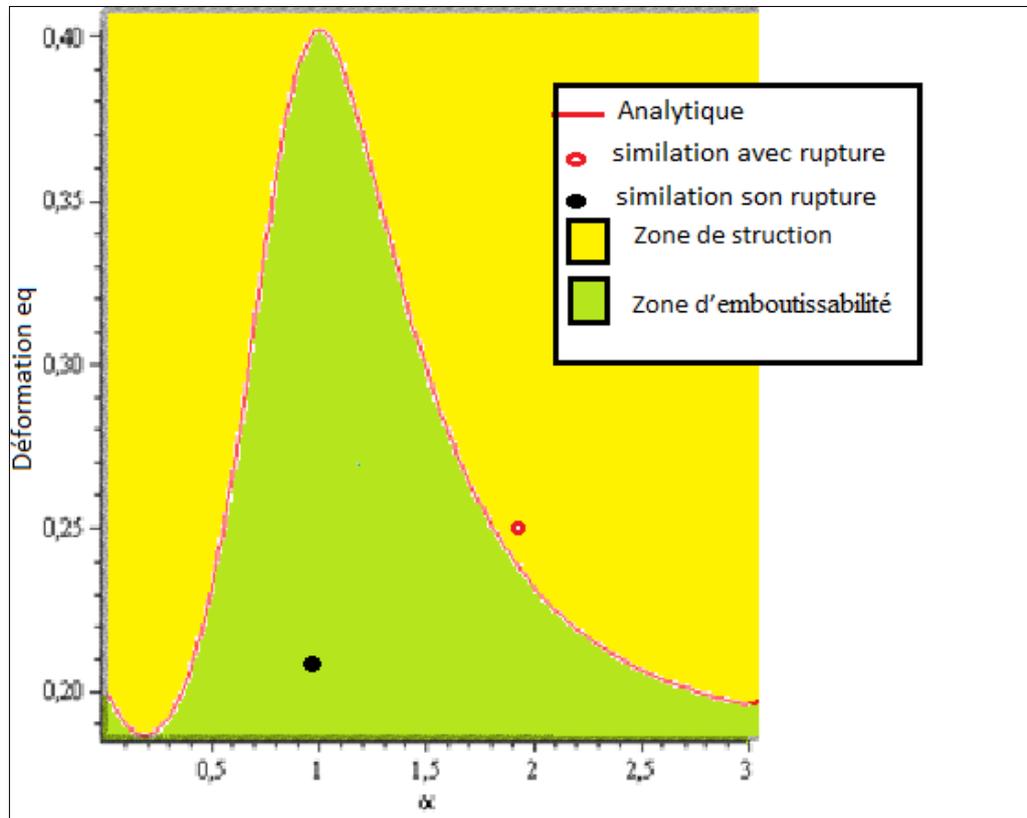


Figure 11: La comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle analytique

La comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle analytique confirme la fiabilité des calculs analytiques. En effet, la simulation donne la rupture pour $\sigma_1 = 2\sigma_2$, c'est-à-dire pour $\alpha=2$. On voit bien que pour $\alpha=2$ on est en dehors de la zone d'emboutissabilité. Par contre pour α égale à 1, l'emboutissabilité est bonne.

5. Conclusion

- 1- La simulation montre que l'amincissement excessif se déroule dans la zone de cisaillement.
- 2- Dans cette zone, la simulation donne un rapport entre la contrainte principale égale à 2 la comparaison au modèle analytique confirme que l'amincissement excessif a bien lieu dans cette zone.
- 3- Le poids de l'effort de serrage a été confirmé par cette simulation. Il s'avère que la diminution de l'effort de serrage permet d'éviter la rupture.

CONCLUSION GENERAL

Ce travail est une contribution en vue de réussir l'emboutissage du bac utilisée dans la brouette fabriquée à Ferroviaal Annaba à partir de la tôle XES produite au laminoir tandem du complexe sidérurgique d'El-Hadjar.

Pour cela, il fallait étudier l'emboutissabilité de la tôle XES et simuler le procédé pour évaluer la sensibilité de l'amincissement aux paramètres d'emboutissage.

L'étude de l'emboutissabilité a nécessité d'abord un travail expérimental pour identifier la loi de comportement suivi d'une étude basée sur une approche analytique pour évaluer la faculté du flan à s'emboutir sans atteindre la striction.

Sur la base de la plasticité associée et les essais de traction réalisés suivant la direction de laminage, la direction transversale et hors axes, la loi d'écrouissage et les coefficients d'anisotropie de Lankford ont été identifiés. Ces derniers ont été introduits dans l'étude analytique et les simulations numériques.

Sur la base des critères de Swift et de Considère, l'étude analytique et les calculs réalisés sous Mapple ont permis d'étudier l'influence du rapport entre les contraintes principales sur l'emboutissabilité de la tôle XES dans les cadres isotropes et anisotropes. Il s'avère que l'anisotropie diminue l'emboutissabilité de la tôle, d'où la nécessité de détruire ces effets par un traitement thermique approprié avant emboutissage.

La simulation numérique sous Abaqus a permis de tirer deux conclusions. La première conclut qu'il faut diminuer l'effort de serrage pour atténuer l'amincissement. La seconde a permis de localiser la striction. Les résultats quantitatifs de la simulation ont montré que la zone de forte striction a lieu pour un rapport entre les contraintes principales égales à 2.

La comparaison entre la simulation numérique et l'approche analytique donne les mêmes conclusions puisque pour ce rapport égal à 2 le calcul analytique conclut que cette zone est dans la striction.

Cette étude pouvait être complète si elle été suivi d'une simulation expérimentale, malheureusement il a été impossible de la mener à cause de l'état des installations actuellement.

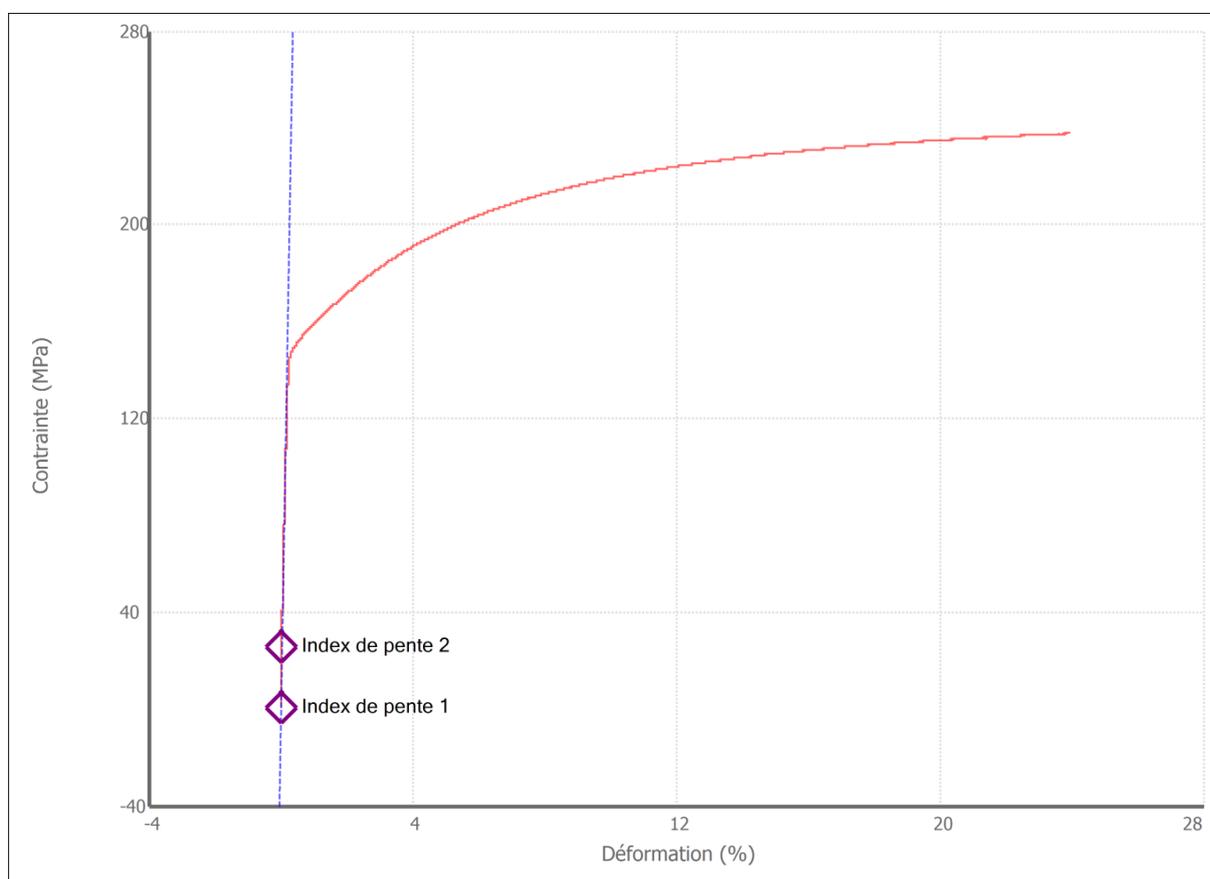
Ce travail mériterait d'être développé dans le futur par une simulation expérimentale et une évaluation plus complète des paramètres d'emboutissage par des simulations numériques.

Annexe

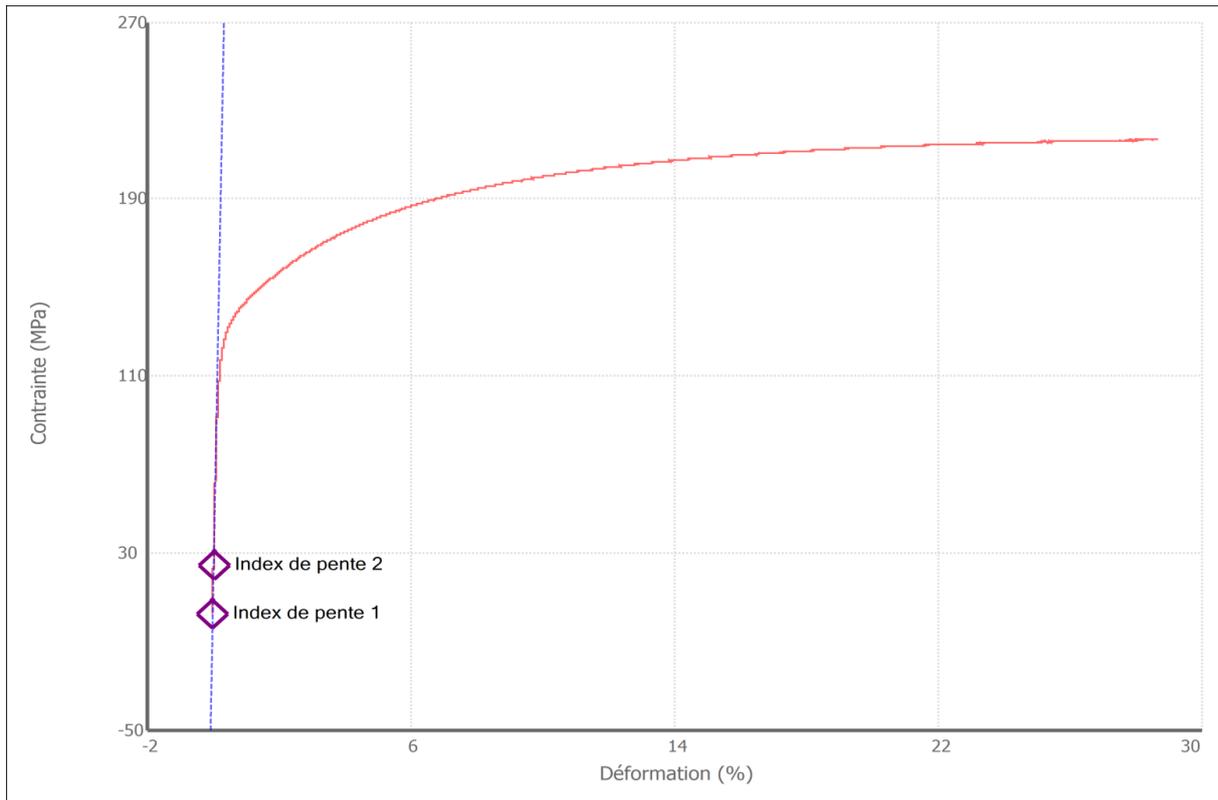
Tant que pas moins de trente essais de traction ont été réalisés, on ne peut pas montrer tous les essais c'est pour quoi on a choisi certains pour mieux comprendre

Les Courbes de traction

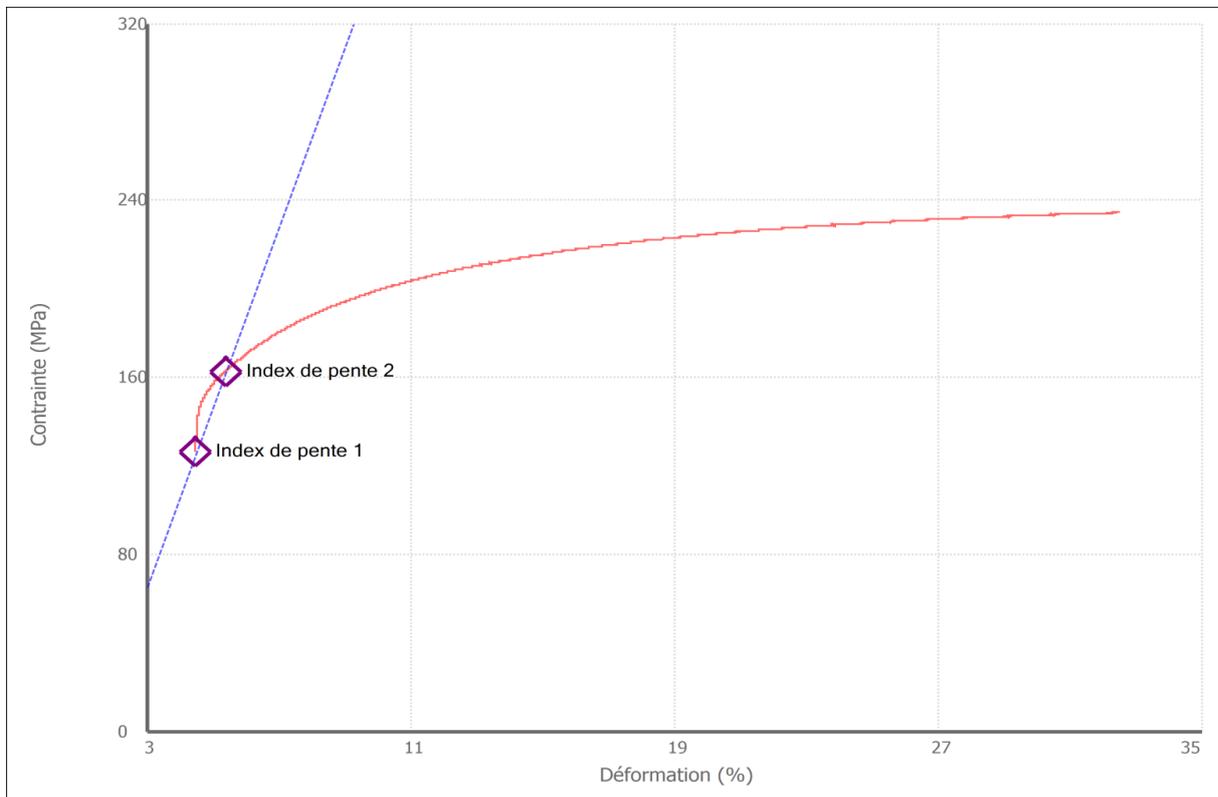
1. Courbe de conventionnelle de direction de laminage (0°)



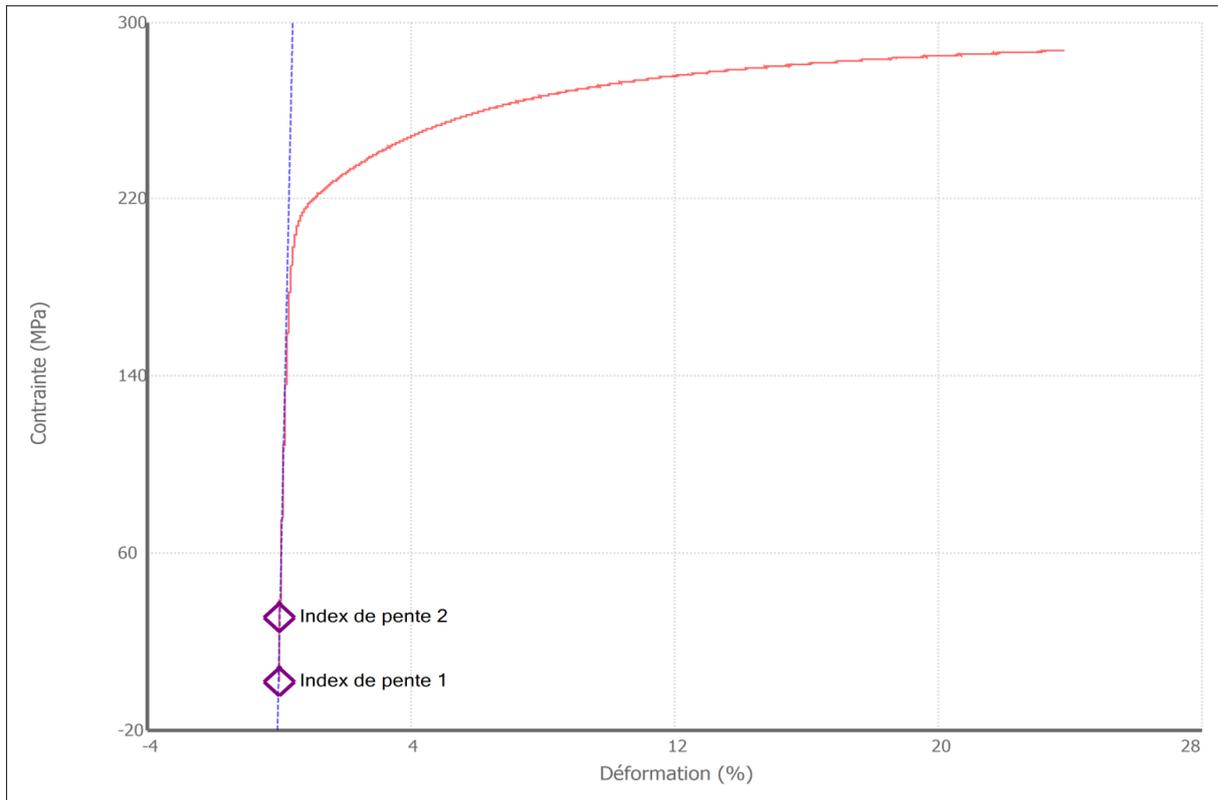
2. Courbe de conventionnelle de direction 30° par apport laminage



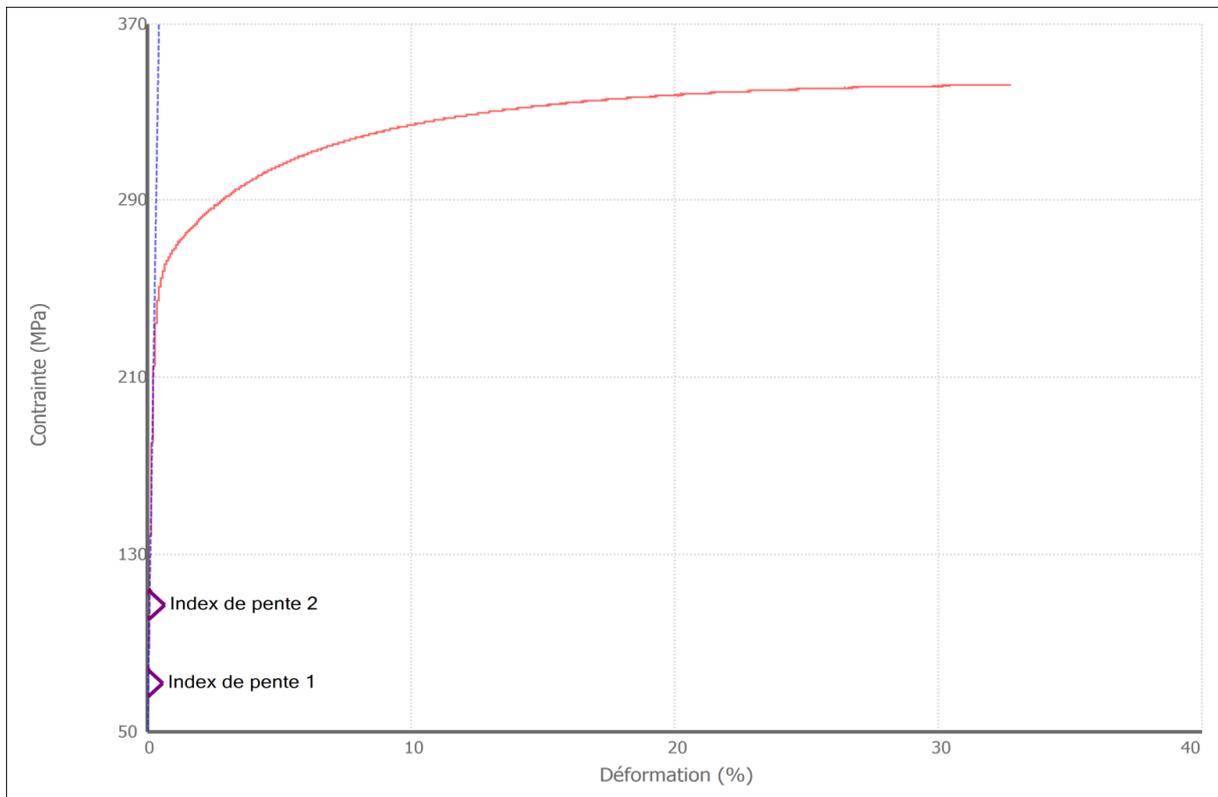
3. Courbe de conventionnelle de direction 45° par apport laminage



4. Courbe de conventionnelle de direction 60° par apporte laminage



5. Courbe de conventionnelle de direction 90° par apporte laminage



Liste bibliographique

- [1] : KHIRANI DALEL Répartition des déformations en étirage pliage et leurs effets sur le retour élastique en 2010
- [2] : Hakim Naceur Compiègne, 25 novembre 2008 Modélisation des problèmes de mise en forme: application l'emboutissage de tôles
- [3] : Définition de protocoles rationnels d'identification de lois de comportement élastoplastiques : Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage Thèse de doctorat 2006
- [4] : « Matériau industriels et Matériaux Métalliques », S8/62292
- [5] : Alain Col, «Emboutissage des tôles, aspect mécanique», Technique de l'ingénieur, 2002, MC1, M3 181.
- [6] : Etude en grandes transformation d'une nouvelle famille d'éléments finis coque triangulaire à trois degrés de liberté par nœud. Application à la simulation numérique de l'emboutissage», Thèse de doctorat, Université de Maine
- [7] :A. Andersson, «Numerical and expérimental évaluation of springbackin a front side membre», Journal of Materials Processing Technology, 169, 2005, pp352–356.
- [8] : Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B., 2004.“ Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure” - Part I : Experimental.observations of the forming process of aluminium alloy. Journal of Materials Processing Technology 148, 119–131. 2004.
- [9] : Tekkaya E., “State of the art of simulation of sheet metal forming”, Journal of Material Proceeding Technologie, 2000
- [10] : impotence du mode de déformation emboutissage des tôles techniques de l'ingénieur M 3 180
- [11] : F Sidoroff. Cours de M-M-C, Ecole centrale de Lyon. 1984.
- [12]: A Dogui.A. F Sidoroff, Large strain formulation of anisotropic elasto-plasticity for metal forming, Comp.Meth. for Predicting Material processing defects, ed. M.Predeleanu, Elsevier, 1987, pp81-85,93-97.
- [13] : A Dogui. Plasticité anisotrope en grandes déformations. Thèse de doctorat d'état es-sciences. Ecole centrale de Lyon. 1989.
- [14]: A Khalfallah, Anisotropic parameter identification using inhomogeneous tensile test, European journal of Mechanics A/Solids 21 p 927 et 935. (2002)
- [15]: NF EN 10130 Septembre 1998Indice de classement: A 36-401

[16]: NF EN 10139 AVRIL 2016

[17] : NF EN 875 NOVEMBRE 1995

[18] :JEAN-PAUL BAILON ; JEAN-MARIE DORLOT, Des Matériaux ,Troisième édition, polytechnique 2000-2001, p 124-138.

[19] : Endommagement et ductilité en mise en forme m3032 techniques de l'ingénieur EN02/02/2013