

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Magistère
Présenté par : **CHIHAOUI SALIM**

Mécanique des Matériaux

L'AMINCISSEMENT DES TOLES MINCES LORS D'UNE OPERATION DE MISE EN FORME

Sous la Direction de :

Pr. ELLAGOUNE SALAH

Les membres de jury :

***Président :** M.LAHMAR Prof. Université de 08 Mai 1945-Guelma-

***Examineurs :**

H.HAMADACHE M.C à Université BADJI MOKHTAR –Annaba-

L .FATMI Prof. Université de 08 Mai 1945-Guelma-

A.BELBAH M.C à Université de 08 Mai 1945-Guelma-

Année Universitaire :

2014/2015

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I	
I-1 Emboutissage	4
I-1-1 Définition	4
I-1-2 L'emboutissage en température	5
I-1-2-1 L'emboutissage à froid.....	5
I-1-2-2 L'emboutissage à chaud.....	5
I-1-3 Modes de déformation de l'emboutissage	6
I-1-3-1 L'emboutissage par expansion	6
I-1-3-2 L'emboutissage par retreint	6
I-1-3-3 Diagramme des différents modes de déformation des tôles	8
I-1-4 Les matériaux et les formes d'emboutissage.....	8
I-1-4-1 Les matériaux.....	9
I-1-4-2 Les formes	10
I-1-5 Aspects métallurgiques de L'emboutissage	10
I-1-5-1 Les critères d'emboutissabilité	11
• Les critères conventionnels	11
▪ Les critères rationnels	11
I-1-5-2 Critères d'acceptation	12
I-1-5-2-1 Plis	12
I-1-5-2-2 Striction / rupture	13
I-1-5-2-3 Aspect de surface	13
I-1-5-2-4 Tolérances dimensionnelles	13
I-1-5-2-5 Retour élastique	13
I-1-6 Les principaux défauts des pièces embouties	14
I-2 Procédure du Pliage	15
I-2-1 Définition	15

SOMMAIRE

I-2-2 Méthodes du pliage	15
I-2-2-1 Pliage en air	15
I-2-2-2 Pliage en frappe	15
I-2-3 Modes de la déformation en pliage	16
I-2-3-1 Pliage en vé	16
I-2-3-2 Pliage en encastrement	17
I-2-3-3 Pliage en U	17
I-2-4 Les caractéristiques d'un pli	18
I-2-4-1 Rayon minimal de pliage	18
I-2-4-2 Le retour élastique	19
I-2-5 Outillage du pliage.....	19
I-2-5-1 La plieuse à tablier	19
I-2-5-2 Les presses plieuses	20
I-2-6 Précision des pièces	21
▪ Pliage en V.....	21
▪ Pliage en U	21
CHAPITE II La méthode des lignes de glissement	
II-1 Introduction.....	22
II-2 Hypothèse de la méthode des lignes de glissement	22
II-2-1 Relations de Hencky.....	25
II-2-2 Utilisation des relations de Hencky.....	26
II-2-3 Propriétés géométriques du réseau des lignes de glissement. Théorème de Hencky.	26
II-3 Construction du réseau des lignes de glissement	27
• Première Méthode.....	27
• Deuxième Méthode.....	28
II-4 Equation de Geiringer	28
II-4-1 Propriétés des lignes de glissement du point de vue des vitesses	28

SOMMAIRE

II-4-2 Utilisation des équations de Geiringer.....	30
II-5 Types de réseaux de lignes de glissement particulières	30
a) Champ homogène.....	30
b) Champ semi-homogène.....	30
II-6 Hodographe.....	31
II-7 Lignes de discontinuité de vitesse.....	31
II-8 Synthèse sur l'utilisation de la méthode des lignes de glissement.....	32
CHAPITRE III Etude expérimentale	
III-1 Caractérisation des matériaux utilisés	33
III-2 Description de l'appareillage utilisé	33
III-2-1 Machine utilisée	33
III-2-2 Extensomètre.....	34
III-2-3 Eprouvette de traction pour la Tôle.....	34
III-3 Procédé expérimental	35
III-4 Essai d'emboutissage	43
III-4-1 Présentation du matériel utilisée	43
III-4-1-1 Machine utilisée	43
III-4-1-2 Modèle d'emboutissage utilisé	43
III-4-1-2 Mesureur de l'épaisseur.....	45
III-4-1-3 Préparation des tôles	45
III-4-2 Mesure des déformations par jauges d'extensomètre.....	46
III-4-2-1 Description du matériel utilisé.....	46
III-4-2-2Principe des jauges.....	46
III-4-2-3 Principe de mesure	46
III-4-2-4 Câblage à 3 fils.....	48
III-4-2-5 Elongation maximale	49
III-4-2-5 Réponse dynamique	49

SOMMAIRE

III-4-2-6 Collage des jauges de déformation.....	49
III-4-2-7 Instruments de mesure (Pont d'extensométrie P3500)	50
III-4-2-8 Réglage du pont	50
III-5 Manipulation du l'essai.....	51
Les résultats de l'essai d'emboutissage.....	51
Chapitre IV Simulation de l'opération de l'emboutissage	
IV-1 Introduction sur le code ABAQUS	68
IV-2 Présentation du logiciel ABAQUS	68
IV-3 La démarche de simulation avec ABAQUS	71
• Les résultats obtenue par la simulation.....	71
IV-4 La méthode des lignes de glissement sur l'opération de l'emboutissage	80
IV-5 Conclusion	88
Conclusion générale.....	89
Bibliographie	
Annexes	

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale :

Dans le domaine de la mise en forme des matériaux métalliques il existe trois types principaux tels que : le moulage, le façonnage (avec ou sans enlèvement de matière) et le frittage. La distinction entre ces trois types est due à l'état de départ du matériau métallique (liquide ou solide). Parmi les techniques de fromage sans enlèvement de matière on trouve les procédés de l'emboutissage et le pliage.

Les procédures de l'emboutissage et le pliage sont des procédés de fromage par déformation plastique à chaud ou à froid des métaux. Il est largement employé dans plusieurs domaines industriels : l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, ou les appareillages électriques...etc. Ils permettent de fabriquer à partir d'une feuille de métal initialement plane, appelée "flan", des pièces de forme complexe [1], [2].

Ces types de procédés permettent d'atteindre des cadences de production élevées, jusqu'à 60 pièces/minute [3]. L'opération d'emboutissage et le pliage sont effectuées sur une presse, au moyen d'un outillage dont la configuration la plus simple, appelée outil simple effet, comprend deux pièces principales : la matrice, le poinçon. L'une est bridée sur la table fixe, l'autre sur le coulisseau animé d'un mouvement rectiligne alternatif. L'outillage double effet comprend en plus une serre-flan.

Plusieurs travaux de recherche sur la technique de l'emboutissage et le pliage, et l'effet de paramètres du procédé (amincissement ; efforts de serrage ; retour élastique...) ont été effectués par beaucoup de chercheurs, analytiquement et/ou expérimentalement, peut citer quelques travaux.

H.ZEIN [4] fait une étude sur les effets de la conception de la matrice sur l'amincissement de tôles minces lors d'une opération de mise en forme (emboutissage) avec le code de simulation ABAQUS/EXPLICIT. Colgan et Monaghan [5] on détermine les facteurs les plus influents sur le procédé de l'emboutissage des tôles avec une approche statistique basée sur les résultats expérimentaux. Demerci [6] fait une étude expérimentale et analytique par la méthode des éléments finis (ANSYS/LS-DYNA) du procédé de l'emboutissage du AL1050. Jawad [7] fait une étude sur l'influence du rayon de poinçon sur les forces de poinçon et les contraintes à travers l'épaisseur du flan lors de l'opération de l'emboutissage du godet.

M.AZOUZI [8] a mis au point une méthode numérique de détermination de la forme des outils d'emboutissage et du flan des pièces de précision en tôlerie fine.

R. BAHLOUL [9] a étudié les ferrures d'ancrage, ce sont des pièces de sécurité automobile qui doivent résister à des chocs sans se rompre. Elles sont issues de tôles en acier à haute limite élastique et mises en forme par découpage et pliage.

Sklad [10] a développé un logiciel de CAO qui permet l'analyse de l'emboutissage en utilisant la méthode "IdealForming", avec la possibilité de création de surfaces additionnelles de forme axisymétrique ce qui permet de calculer la taille du brin libre et ainsi il obtient la forme du flan. Si la conception des surfaces additionnelles est faite manuellement avec un logiciel de CAO, plusieurs corrections doivent être faites en accord avec les résultats de la simulation de l'emboutissage.

M.S.CHABBAH [11] a étudié l'optimisation des paramètres de retour élastique dans lefromage des tôles minces, A.ASSEMPOUR [12] qui fait une étude sur la variation de l'épaisseur lors du procédé de l'emboutissage avec la méthode des lignes de glissement, F.ABBASSI [13] a fait une recherche sur l'amincissement des tôles (acier AISI 304L) lors d'une opération de mise en forme. R.NARAYANASAMY [14] a fait une étude sur le fromage, fracture et courbes limites de fromage des tôles d'acier, P.H.MATIN [15] a fait une étude expérimentale et une simulation de l'emboutissage à chaud des aciers trempables. J.R RICE [16] fait une recherche sur la méthode des lignes de glissement en déformation plane pour des matériaux rigides et plastiques.

Plus plusieurs travaux se basent sur la prévision de localisation de l'amincissement des tôles lors des opérations de mise en forme ont été même par (Lian.J1989 [17]; Friedman and Pan 2000 [18]; Yao and Cao, 2002[19]; Cao 2000[20])

Dans ce mémoire nous allons essayer de déterminer une étude expérimentale d'une opération de mise en forme, en l'occurrence le pliage ou l'emboutissage. Lors de cette opération les pièces subissent une diminution d'épaisseur qui peut aller jusqu'à l'apparition de fissures provoquant des défauts de déchirement dans les tôles. Afin de prédire cet amincissement nous allons essayer de déterminer une méthode de calcul basée sur celle des lignes de glissement et la conforter à l'aide de résultats expérimentaux soit lors d'une opération de mise en forme, en l'occurrence le pliage ou l'emboutissage. Dans ce sujet nous allons utiliser plusieurs caractéristiques à savoir différentes épaisseurs pour montrer l'influence qu'ils ont sur l'amincissement des tôles au cours de l'opération de mise en forme.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous commençons par rappel des principales définitions liées aux procédés d'emboutissage et pliage, ces principes, les domaines d'application de ces procédés, les paramètres influant sur la formabilité à savoir les formes géométriques, structure de la tôle ainsi que le retour élastique avec le retrait de la matrice après déformation.

Le deuxième chapitre consacré à la présentation du principe de la méthode des lignes de glissement, en posant des hypothèses de la méthode, et la détermination des propriétés géométriques du réseau des lignes de glissement qui peut être fait soit par une méthode numérique ou graphique.

Le chapitre trois concerne l'étude expérimentale pour une tôle mince pour différentes épaisseurs (0.5, 0.7 et 1mm), sachant qu'on fait une caractérisation mécanique sur les trois tôles avec l'essai de traction unidirectionnel (E , σ_e , σ_r , ...) pour chaque épaisseur et dans différents sens de laminage (0° , 90°), sur une machine d'essai universel à l'aide d'un extensomètre à couteaux liés à l'ordinateur pilotant la machine de traction, ensuite on fait les essais de l'emboutissage pour déterminer le comportement de la tôle, tel que déformation au centre de la partie en porte-à-faux entre le serre-flan et le poinçon à l'aide des jauges de déformation reliées à un pont d'extensomètre, l'amincissement est déterminé après essai par un mesureur d'épaisseur à l'aide de la méthode des ultrasons portatifs, l'enregistrement des données est intégré directement dans le mesureur et ceci afin d'améliorer l'enregistrement des lectures des épaisseurs.

Dans le quatrième chapitre nous avons fait une simulation en 2D et 3D pour l'opération de l'emboutissage avec le code ABAQUS pour les différentes épaisseurs 0.5, 0.7 et 1mm, ensuite on a tiré quelques résultats (contraintes, épaisseurs), après ça nous avons appliqué la méthode des lignes de glissement sur notre essai de l'emboutissage et conforter aux résultats de la simulation avec ABAQUS.

À l'issue de ce mémoire, une conclusion générale.

CHAPITRE I

I-1- Emboutissage :

L'emboutissage est un terme largement employé pour toute une variété de procédés dans lesquels un produit non plat (ou non développable) est généré autrement deux processus différents intervenants lors d'une opération d'emboutissage : l'emboutissage profond et l'expansion. Dans le cas de l'emboutissage profond (ou opération de rétreint pur) la surface supplémentaire requise pour le produit est obtenue par avalement de matériau à partir d'un réservoir appelé zone serre-flan. Il ya mouvement le long de la surface de la matrice, non nécessairement plane, une des grandes difficultés du procédé est de contrôler cet écoulement de matière qui va conditionner en partie la réussite de l'emboutir notons que cet écoulement dépend du frottement matière-outils. Dans le cas du second mode de déformation : l'expansion pure, la surface supplémentaire requise pour former la pièce est obtenue sans apport externe de matériau, Ainsi, alors qu'en emboutissage profond l'épaisseur de la tôle demeure relativement constante, en expansion, le matériau s'amincit jusqu'à 50% dans les cas extrêmes.

On distingue trois types d'outils en emboutissage : la matrice, le serre-flan et le poinçon, la présence du serre-flan, utilisé pour contrôle de la planéité de la tôle et de son mouvement, distingue ce procédé du simple estampage.

I-1-1 Définition :

L'emboutissage est un procédé de mise en forme très utilisé dans l'industrie, permettant d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince, montées sur la presse. La tôle appelée « flan », est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. L'opération peut être réalisée avec ou sans serre flan pour maintenir le flan contre la matrice pendant que le poinçon déforme la feuille.

Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau. Les zones d'étirement subissent un amincissement (qui doit rester limité pour éviter la rupture) et les zones de rétreint (compression) subissent une combinaison d'épaississement et de plissement : on cherche en général à éviter ce dernier effet, mais il ne peut jamais être complètement absent et on cherche donc à le provoquer dans des parties de tôle qui seront éliminées dans la suite du processus de fabrication. Selon la profondeur ou la forme de la pièce, plusieurs passes dans des outils différents peuvent être nécessaires.

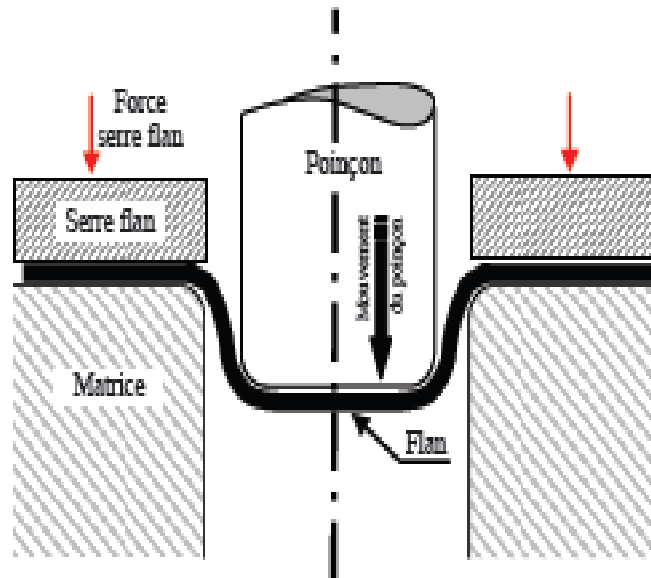


Figure 1: Procédé de l'emboutissage [21]

I-1-2 L'emboutissage en température :

Il existe deux techniques d'emboutissage en température :

I-1-2-1 L'emboutissage à froid :

Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage double effet mais peut aussi l'être sur un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'efforts d'emboutissage.

I-1-2-2 L'emboutissage à chaud :

Principalement utilisé sur les presses hydrauliques simples ou double effet. Cette technique facilite la déformation du matériau, permet l'emboutissage de pièces profondes par chauffage du flan (et de la matrice) et évite l'écrouissage et la génération de contraintes résiduelles. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid du fait de l'inertie de chauffage. De plus les pièces finissent sa de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement.

I-1-3 Modes de déformation de l'emboutissage :

L'emboutissage impose à la tôle différente mode de déformation dont le but est de conduire à l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas-limites de déformation : l'expansion et le retrait.

I-1-3-1 L'emboutissage par expansion :

Dans le cas de l'emboutissage par expansion, le flan est bloqué sous la serre-flan donc l'épaisseur sous le poinçon diminue.

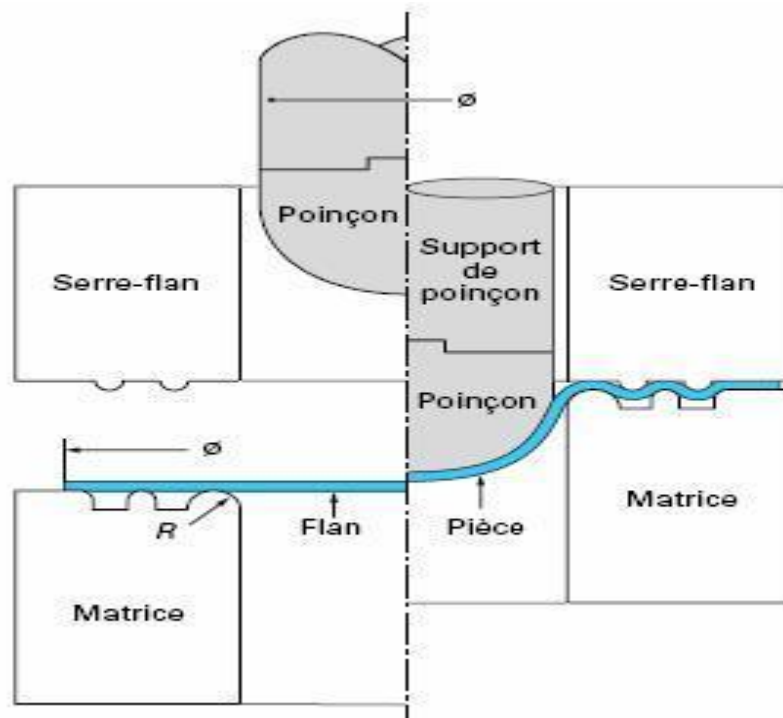


Figure 2 : L'emboutissage par expansion [22]

I-1-3-2 L'emboutissage par retrait :

Par contre dans le cas de l'emboutissage par retrait du métal, ce dernier glisse sous la serre-flan, donc l'épaisseur entre serres-flan et matrice diminue et reste constant sous le poinçon.

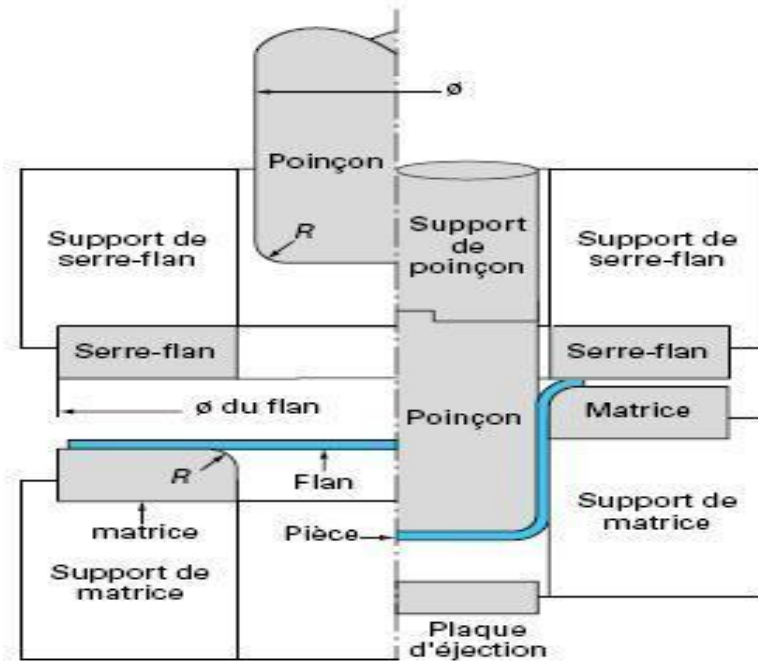


Figure 3 : L'emboutissage par retreint [22]

Il existe une infinité d'autres modes dépendant principalement de l'importance du glissement de la tôle sous la serre-flan, par exemple, dans le cas de l'emboutissage d'une pièce cylindrique à fond plat, illustrée par la figure (4). On voit apparaître l'expansion et le retreint ainsi que l'évolution de différents modes de déformation le long de la pièce emboutie.

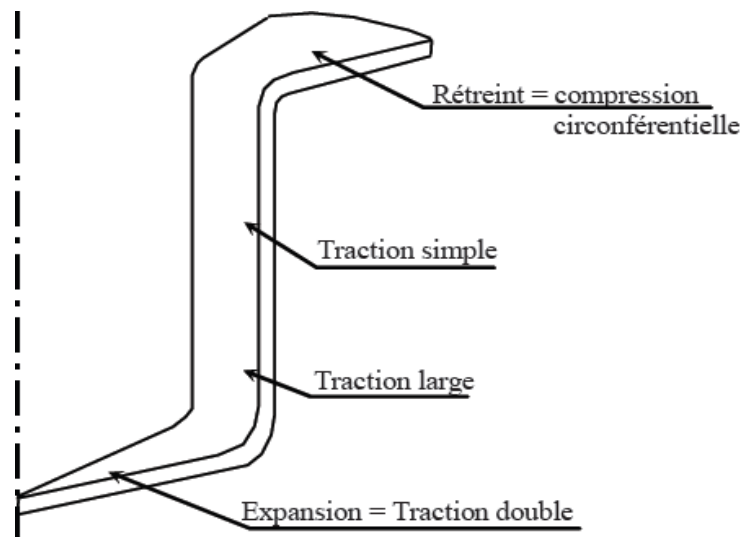


Figure 4 : Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de révolution [21]

I-1-3-3 Diagramme des différents modes de déformation des tôles :

La figure (5) indique la répartition des différents modes de déformation dans le plan (ε_1 , ε_2), ε_1 correspond aux déformations principales maximales tandis qu' ε_2 aux déformations principales minimales ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$).

Selon ce diagramme, la tôle peut subir des déformations en bi-expansion ou expansion pure ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > 0$), en traction large ($\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 = 0$) ou en traction uniaxiale ($\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 < 0$). Ces modes entraînent une diminution de l'épaisseur de la tôle. Un épaissement de cette dernière peut apparaître dans le cas de la compression par exemple ($\varepsilon_1 < -\varepsilon_2$). La tôle peut ainsi être sollicitée dans plusieurs modes de déformation de façon simultanée ou alternée lors de sa mise en forme.

Dans le cas particulier de la traction uniaxiale, $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2(r+1)/r$, où r est le coefficient d'anisotropie. Pour un matériau isotrope, $r=1$, d'où $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$. L'espace situé en bas et à droite de la première bissectrice est éliminé par la convention $\varrho_1 > \varepsilon_2$. La limite entre la traction et la compression est le cas de cisaillement pur défini par $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$

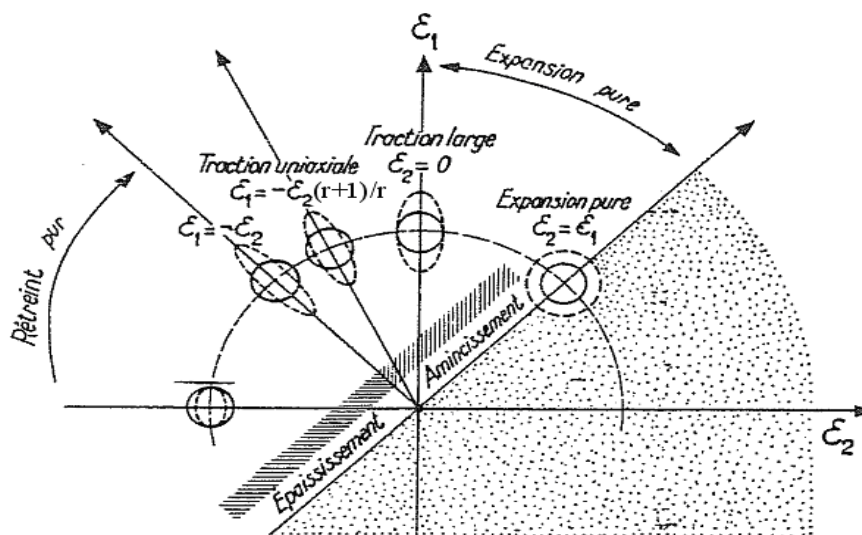


Figure 5 : Diagramme des différents modes de déformation des tôles [23]

I-1-4 Les matériaux et formes de L'emboutissage :

La technique d'emboutissage permet de mettre en forme de nombreux matériaux que ce soit des aciers, des alliages non ferreux. Néanmoins, la mise en œuvre d'une opération d'emboutissage d'une tôle nécessite certains réglages ou certaines actions préalables dépendant de la nature même du matériau.

I-1-4-1 Les matériaux :

Les aciers :

Les techniques modernes de laminage permettent d'obtenir des tôles d'acier très minces, avec une surface propre et lisse, une structure homogène et une gamme de caractéristiques mécaniques adaptées aux exigences de l'emboutissage. Ces tôles sont classées en trois catégories : tôle de fabrication courante (TC), tôle d'emboutissage (E), et tôle d'emboutissage spéciale (ES).

Les aciers inoxydables se comportent différemment de l'acier doux en raison de la présence de nickel et de chrome. Ainsi les vitesses d'emboutissage doivent être plus lentes que pour les autres nuances.

Les alliages non ferreux :

Les laitons : Les plus couramment utilisés sont ceux désignés sous le nom de (60% ; 40%) (Contenant 60% de cuivre et 40% de zinc) (Avec addition de plomb pour les utilisations en horlogerie et sans addition pour les pièces optique, de sidérurgie) et de (72% ; 28%) (Pour l'emboutissage extra profond). Il est employé pour la fabrication de cartouches et de douilles évitant des opérations de recuit).

L'aluminium et ses alliages : ces alliages s'écrouissent à l'emboutissage, l'étirage profond ne s'obtient qu'avec les qualités les plus douces. On peut toutefois obtenir des emboutis peu profond avec des qualités plus dures.

Le cuivre : non allié appelé cuivre rouge possède d'excellentes qualités d'emboutissage extra profonds ; souvent supérieures à celles du laiton ou des aciers spéciaux.

Le zinc : il s'emboutit facilement mais, dans le cas d'emboutissage de forme complexe, il est nécessaire de le chauffer entre 100 et 150°C.

Le nickel et ses alliages : ils possèdent d'excellentes qualités d'emboutissage. Les plus couramment utilisées sont ceux contenant 60 à 65% de cuivre, 20 % de zinc, et 15 à 20 % de nickel.

Le magnésium : c'est le plus léger des métaux utilisés dans l'industrie. A température ambiante le magnésium ne peut être embouti que dans certaines limites. Pour réaliser des pièces semblables à celles obtenues avec l'acier, il est indispensable de chauffer de 200 à 500°C en fonction de la qualité d'emboutis souhaités.

Le titane : ce métal se comporte comme le magnésium : les flans doivent être chauffés entre 200 et 350°C, selon s'il s'agit de titane pure ou d'un alliage. La matrice et le poinçon sont également chauffés pour éviter le choc thermique auquel le métal est sensible.

I-1-4-2 Les formes :

L'emboutissage est une opération qui a pour but, avec un outil approprié, de transformer une tôle plane en une pièce .On peut obtenir des différent formes parmi les quelles on a :

- les formes cylindriques : sont facilement réalisable avec de bonnes conditions opératoires. A partir de cette forme simple il est possible de réaliser des formes plus évoluées avec la méthode d'emboutissage dit renverser.
- les formes coniques : la forme conique ne peut être obtenue qu'après au moins 4 passes. Cette technique permet d'obtenir des formes qu'il aurait été impossible en une seule passe.
- les formes rectangulaires ;
- les formes hémisphériques : l'emboutissage d'une demi-sphère est difficile en raison de la formation de plis mais il est possible en une seule passe si la matrice est munie d'un bourrelet
- les formes complexes : Ces formes sont relativement difficiles à réaliser et ne sont généralement réalisables qu'avec un emboutissage par étapes, c'est à dire un emboutissage où la forme désirée n'est obtenue qu'après un certain nombre de phases successives.

I-1-5 Aspects métallurgiques L'emboutissage :

L'étude de l'emboutissage suivant l'aspect métallurgique tend à mettre en évidence une relation générale entre l'influence des caractéristiques du métal et les performances obtenues sur presse. On parle dans ce cas des critères d'emboutissabilité, et des critères d'acceptation.

I-1-5-1 Les critères d'emboutissabilité :

Ces critères ont pour but de juger l'aptitude d'une tôle à subir les différentes déformations possibles d'emboutissage. On considère deux types de critères :

- **Les critères conventionnels :**

Ce sont les plus rapides et les moins coûteux à mettre en œuvre car il s'agit de simples essais sur le flan tendant à reproduire autant que possible les déformations survenant sur presse. On utilise principalement les essais de traction et de dureté pour déterminer des caractéristiques indispensables du métal. Les matériaux pour emboutissage, doivent posséder une résistance à la rupture très élevée pour résister à la traction uniaxiale, une limite élastique faible des allongements importants et une faible résistance à la compression tangentielle sous la serre flan (c'est à dire une bonne aptitude au rétreint).

- **Les critères rationnels :**

Ce sont les plus difficiles et les plus coûteux à déterminer mais ce sont eux qui offrent le meilleur jugement face à l'emboutissabilité d'une tôle. Il en existe deux : les coefficients d'écrouissage « **n** » et d'anisotropie « **r** ».

Le coefficient d'écrouissage **n** : il est lié à la consolidation du matériau. Rappelons que l'écrouissage augmente la résistance à la rupture ainsi que la limite élastique qui se rapproche ainsi de la résistance à la rupture.

L'anisotropie **r** : Du fait de l'orientation préférentielle des cristaux, la tôle ne possède pas les mêmes propriétés mécaniques suivant la direction considérée. Il en résulte aussi une perte de l'équilibre des déformations entre la largeur et l'épaisseur lors d'un essai de traction uniaxiale.

I-1-5-2 Critères d'acceptation :

Dans le cas des procédés de mise en forme par emboutissage, les critères d'acceptation peuvent être divers. Ils se rattachent à des problèmes de résistance mécanique, de tolérances dimensionnelles ou de qualité d'aspect de surface. De par le principe même de l'emboutissage, la réalisation d'une pièce est un compromis entre des déformations en rétreint et des allongements en expansion dont les limites respectives sont les phénomènes de plissement et ceux de striction / rupture qui constituent les critères de base de mise au rebut. Mais des causes supplémentaires de rebus peuvent également être prises en considération au niveau des tolérances dimensionnelles, du retour élastique et de l'aspect de surface.

I-1-5-2-1 Plis :

On appelle plis, les ondulations de la tôle résultant d'un flambement local associé à un champ de contraintes de compression. Généralement associés à des déformations en rétreint, ils peuvent apparaître aussi bien dans les zones de la tôle qui momentanément ne sont en contact ni avec la matrice, ni avec le poinçon que sous serre-flan. Ils peuvent résulter aussi bien des contraintes de formage proprement dites que des contraintes résiduelles libérées après retrait du poinçon et extraction de la pièce hors de la matrice.

I-1-5-2-2 Striction / rupture :

La rupture se produit généralement dans les zones de l'embouti sollicitées en expansion ou en traction plane. Son apparition signifie en fait que les déformations locales ont dépassé la capacité d'allongement plastique du métal. L'absence de rupture n'est cependant pas suffisante pour garantir la réussite de l'embouti. La striction, amincissement localisé de la tôle juste avant rupture, constitue également un motif de rebus. Parfois difficile à déceler, elle s'accompagne généralement d'une granulosité plus forte en périphérie. Elle peut aussi apparaître sous l'aspect de chanfreins sur les rayons les plus petits, associés à des débuts d'entailles dans la matière.

I-1-5-2-3 Aspect de surface :

Les défauts d'aspect peuvent être classés en deux catégories :

- Les défauts accidentels (picots, rayures, marquages divers) liés à des incidents survenus au cours de la manipulation des pièces comme au cours du formage et dont la prévention passe par une préparation et un entretien soignés de l'ensemble des moyens de production (propreté des outils, manipulateurs et palettes de stockage adaptées).
- Les défauts systématiques liés à une hétérogénéité de déformation ou au glissement du métal sur le rayon d'entrée de la matrice résultant directement des choix opérés lors de la conception de la gamme et dont l'acceptabilité repose sur la non visibilité des zones correspondantes sur le produit fini.

I-1-5-2-4 Tolérances dimensionnelles :

La pièce emboutie n'est jamais exactement conforme à la géométrie de la CAO désirée. Certes, elle s'en rapproche de très près, mais présente toujours des écarts qui ne peuvent généralement être complètement annulés du fait des dispersions inévitables de l'ensemble des paramètres qui régissent le procédé.

I-1-5-2-5 Retour élastique :

Le retour élastique qui se produit après retrait du poinçon est inhérent à de nombreux procédés de mise en forme. Il conduit à un écart géométrique entre la forme désirée et la pièce réelle obtenue après fabrication. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la limite d'élasticité du métal est plus élevée et son module d'élasticité plus faible. Il se traduit généralement par une augmentation des rayons de courbure d'autant plus grande que ce rayon est grand, une ouverture des angles et un raccourcissement des fibres sous tension dans l'outil. Le retour élastique engendre une distribution de contraintes fortement hétérogène à travers la pièce et plus particulièrement dans l'épaisseur. Et celles-ci perdurent sous forme de contraintes résiduelles. Ce sont ces contraintes résiduelles qui entraînent des écarts géométriques du fait d'une redistribution de l'énergie emmagasinée lors du chargement. Ces écarts peuvent être minimisés par une mise au point méticuleuse des outils.

I-1-6 Les principaux défauts des pièces embouties :

Les défauts rencontrés sur les pièces embouties sont soit des défauts structurels et géométriques soit des défauts d'aspect (rugosité).

A titre d'exemple, nous pouvons citer les défauts dus au retour élastique de la pièce lorsqu'elle est retirée de l'outillage. Cela se manifeste par des déflexions de certaines zones de la pièce.

Lorsque la pièce est déformée de manière trop importante, on voit apparaître des phénomènes d'augmentation de la rugosité de la surface de la pièce. On parle alors de peau d'orange. Ces types de défaut engendrent des rebuts par exemple dans le cas de pièces qui sont, à posteriori, peintes comme pour des éléments de carrosserie.

Des phénomènes de flambage circonférentiel apparaissent (figure 6-a) lorsque la pression de serre flan n'est pas suffisante.

Des défauts structurels tels que les déchirures de pièces sont dus à des trop forts amincissements localisés de la pièce. On parle alors de défonçage (figure 6-b). La progression ou les conditions de fabrication sont alors à redéfinir.

Enfin, l'anisotropie du matériau engendre la formation de cornes dues notamment à des propriétés du matériau qui ne sont pas homogènes selon les directions de déformation (figure 6-c).

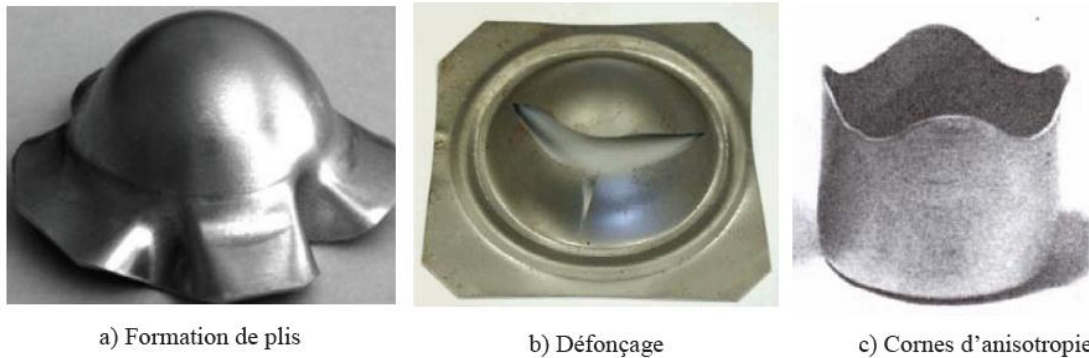


Figure 6 : Les principaux défauts des pièces embouties.

I-2 Procédure du Pliage :

I-2-1 Définition :

Le pliage est un procédé d'obtention des pièces par déformation plastique à partir de tôles plates. La forme à obtenir est une forme développable. C'est à dire en « dépliant » la pièce on peut obtenir, ou presque, la forme initiale du flan. Ceci étant en négligeant les allongements dus aux rayons de pliage [24]

I-2-2 Méthodes du pliage :

I-2-2-1 Pliage en air :

La tôle s'appuyant par deux génératrices le long des bords du vé, est déformée par la pression exercée par le poinçon. Un seul jeu d'outils poinçon-matrice permet d'exécuter des plis différents vu que la matière ne subit pas de matriçage, l'angle recherché s'obtient en sur pliant et laissant revenir la matière par élasticité. Ce type de pliage s'applique aux tôles d'épaisseur moyenne (2à15mm) voir fort (>15mm)

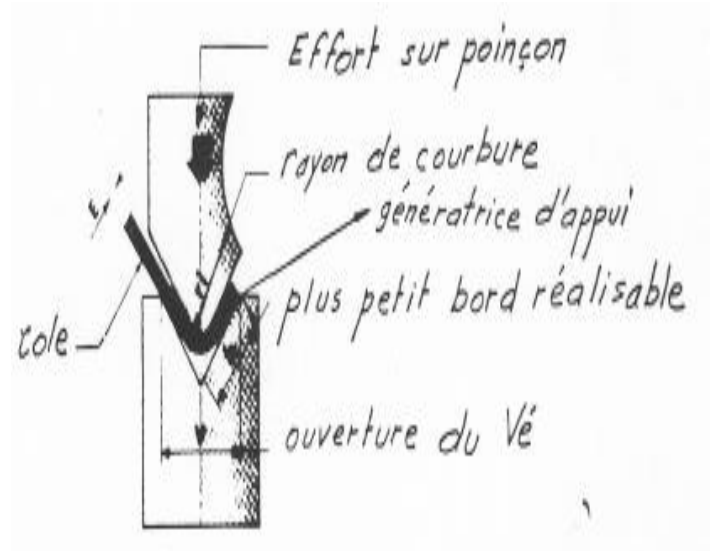


Figure 7: le pliage en l'air

I-2-2-2 Pliage en frappe :

La tôle est matricée et le pli est obtenu avec une précision élevée, vu qu'il n'y a pas de "retour" de la tôle, par suite de l'élasticité du métal. Cette méthode nécessite cependant des efforts plus élevés que le pliage en l'air (5 à 8 fois). Elle s'applique surtout aux tôles minces (0,4 à 2 mm).

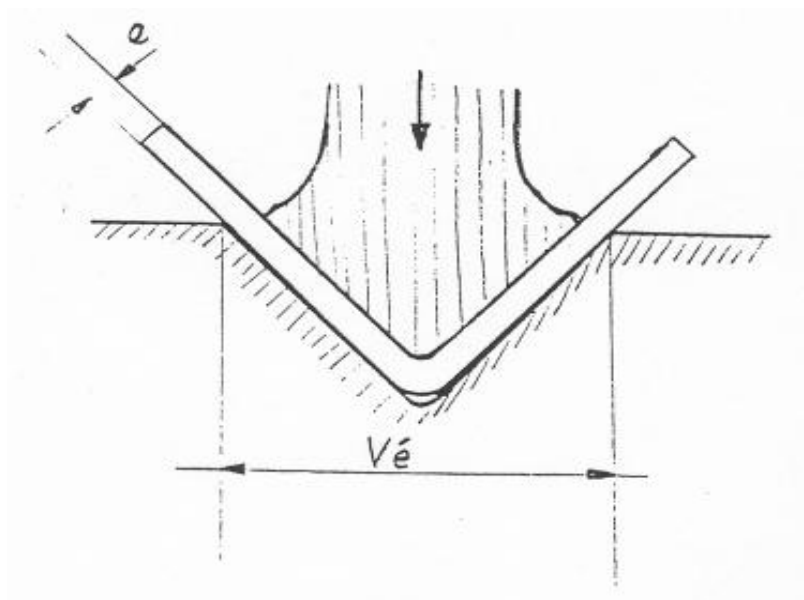


Figure 8: le pliage en frappe.

I-2-3 Modes de la déformation en pliage :

I-2-3-1 Pliage en vé :

Le schéma de pliage pour ces deux méthodes est assimilé à un schéma de flexion comme celui ci-dessous. Les points d'appuis du schéma représentent les arêtes du vé, et une flèche symbolise une force. C'est le réglage de la descente du poinçon qui donnera l'angle final du pliage.

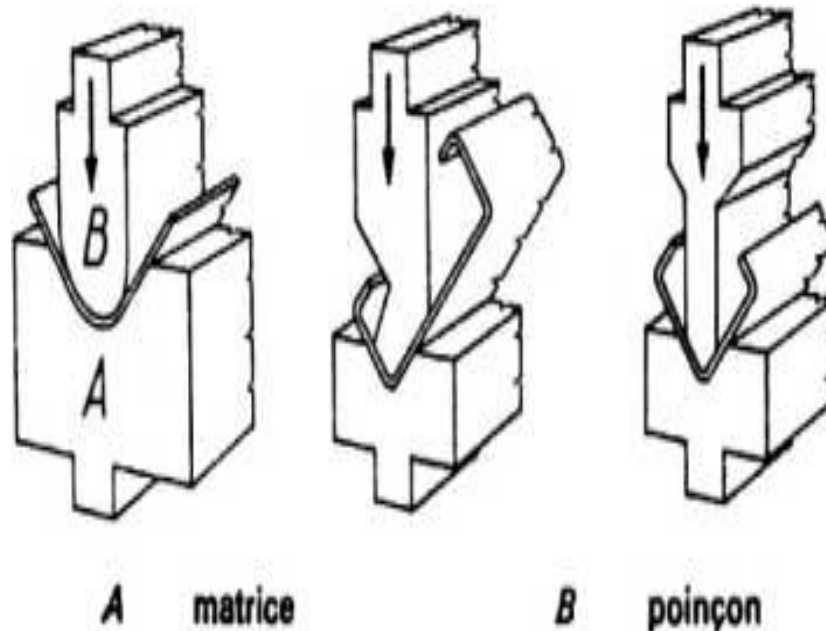


Figure 9: pliage en vé.

I-2-3-2 Pliage en encastrement :

Cette méthode un peu moins usitée utilise le serrage de la pièce à plier, entre le sommier et la table, puis la déformation par « bras de levier » grâce à un sabot. On utilise la force manuelle ou une force mécanique pour cette méthode.

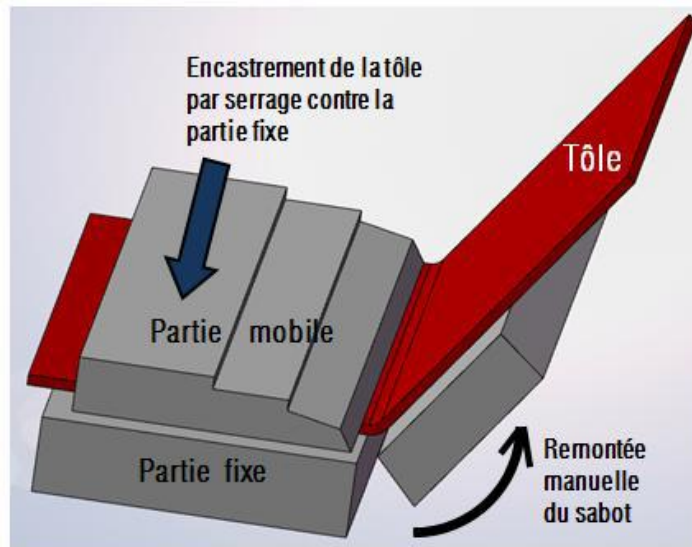


Figure 10: Pliage en encastrement.

I-2-3-3 Pliage en U :

Le principe est voisin de celui du pliage en vé. Seuls les outils (poinçons et matrices seront différents). Cela ressemble cependant a de l'emboutissage. On peut obtenir avec cette méthode une infinité de formes pliées, si les outils sont disponibles.

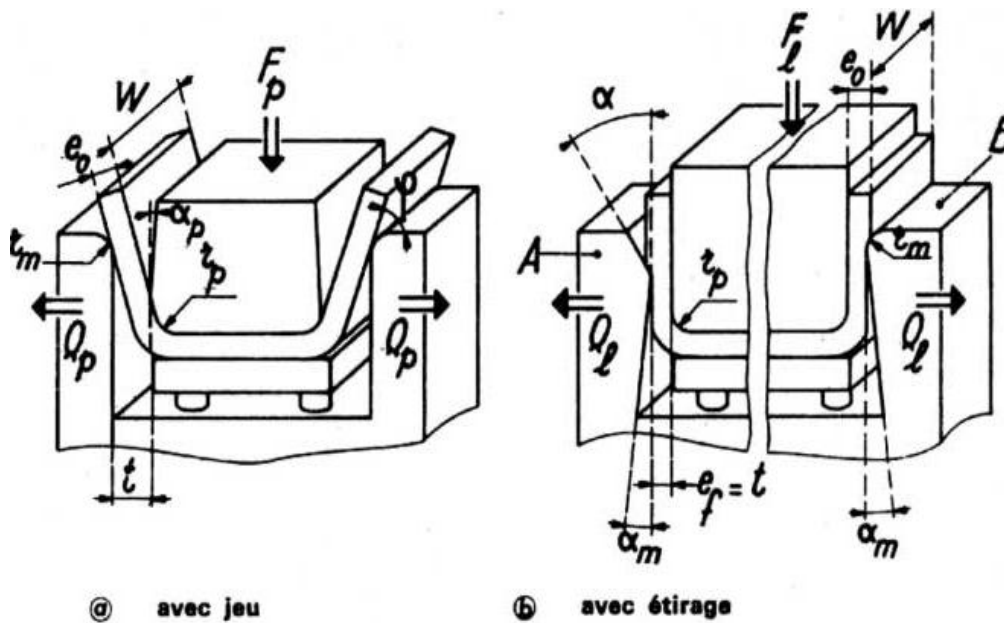


Figure 11: pliage en U.

I-2-4 Les caractéristiques d'un pli :

I-2-4-1 Rayon minimal de pliage :

Lors du pliage d'une tôle, dans le pli, se produit une déformation plastique. Cette déformation est de type allongement de la partie extérieure et compression de la partie intérieure [25]

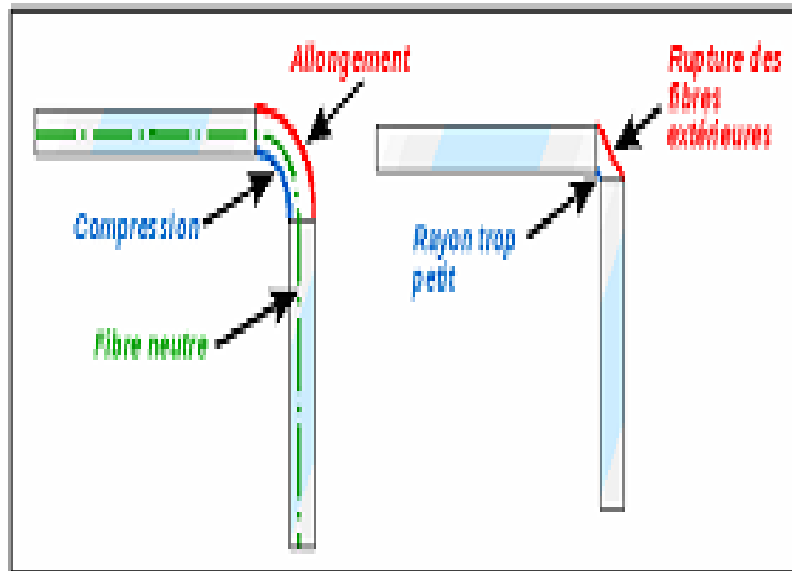


Figure 12 : Opération de pliage d'une tôle.

Cette déformation doit assurer le non rupture du matériau dans cette zone. Autant le rayon de pliage est grand, autant la déformation plastique est minimale. La fibre neutre est une fibre qui ne subit pas de déformation.[26]

L'équation donnant la valeur du rayon minimal est la suivante :

$$R_{\min} = \frac{e}{\frac{A-4}{100-Z} \times \left(\frac{A-4}{100-Z} + 2 \right)}$$

Avec : R_{\min} : rayon minimal de pliage (mm).

e : épaisseur de la tôle (mm).

A (%) : allongement.

Z (%) : coefficient de striction.

L'expression du rayon de pliage R désigne toujours le rayon intérieur.

I-2-4-2 Le retour élastique :

Lors du pliage d'une pièce à un angle imposé par l'outillage (angle du vé sur presse plieuse), il ya un retour élastique lors du retrait du poinçon. [27]

L'angle final α_f obtenu diffère de celui imposé par l'outillage (α_i) de la valeur correspondant à ce retour élastique. Plus la limite élastique de l'alliage est grande plus le retour élastique sera grand. On peut vouloir estimer ce retour élastique qui dépend aussi du rayon de pliage et de l'épaisseur, mais il est souvent plus simple et plus fiable de faire quelques essais et corriger l'angle de pliage en fonction des résultats obtenus à partir de quelques échantillons.

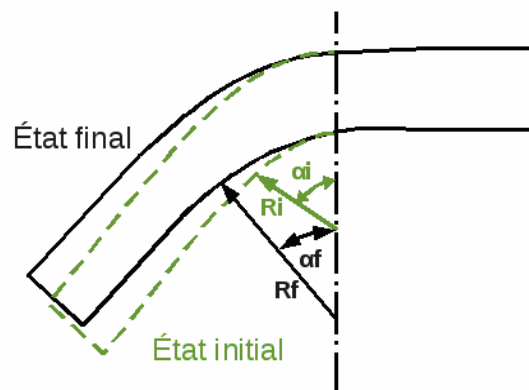


Figure 13 : Retour élastique d'une tôle pliée.

I-2-5 Outillage du pliage:

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

I-2-5-1 La plieuse à tablier :

Cette machine convient mieux dans un petit atelier de tôlerie.

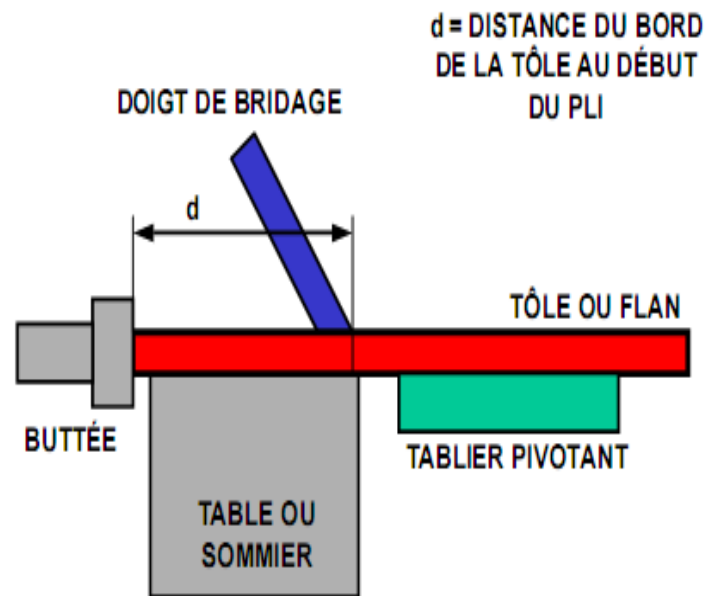


Figure 14: Plieuse à tablier.

I-2-5-2 Les presses plieuses :

Sont des machines très puissantes que l'on utilise pour les pliages de métaux en feuilles de toutes épaisseurs.

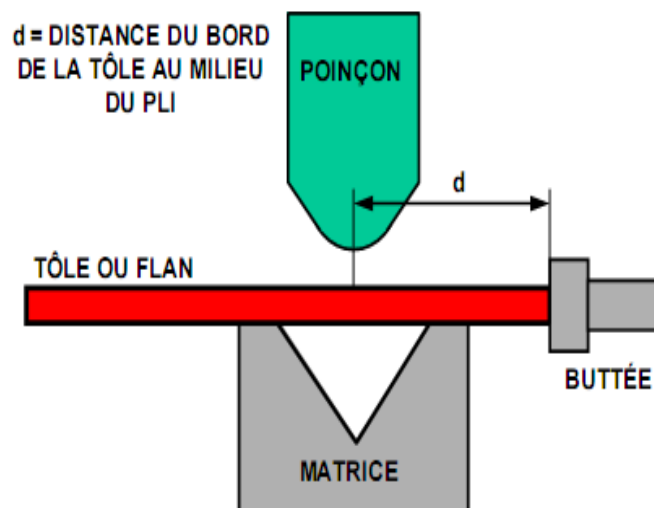


Figure 15: Presse plieuse

I-2-6 Précision des pièces :

La principale difficulté du pliage consiste à maîtriser le retour élastique qui apparaît systématiquement si la zone écrouie est relativement localisée (exemple : rayon de pliage). C'est en fait la maîtrise du retour élastique qui conditionne avec la qualité de l'outillage la précision des pièces.

- **Pliage en V**

On peut annuler le retour élastique par une frappe à fond de matrice mais cette solution présente l'inconvénient de surcharger les machines et de n'être applicable qu'aux presses mécaniques.

Il est préférable de diminuer l'angle de la matrice. Cette diminution sera d'autant plus importante que la limite élastique du matériau est élevée.

- **Pliage en U**

La précision des angles peut être obtenue de l'une des solutions préconisées pour le pliage en V, aux quelles il est possible d'ajouter l'étirage des ailes. Dans ce dernier cas, il est recommandé d'utiliser des matrices à angle d'attaque jusqu'à des étirages de 20 % et des matrices à rayon d'attaque au-delà

CHAPITRE II

II-1 Introduction:

Les méthodes de calcul en plasticité ont profondément évolué ces dix dernières années, à partir des travaux des pionniers en viscoplasticité et en élasto-plasticité. Les méthodes utilisées jusque-là: méthode des tranches, méthodes extrémales, méthode des lignes de glissement, méthode de viscoplasticité, sont progressivement remplacées par la méthode des éléments finis dont la puissance et la souplesse permettent de prendre en compte des géométries complexes, des comportements de plus en plus réalistes, et de développer des codes de calcul utilisables dans l'industrie.

La méthode du champ des lignes de glissement s'applique au cas du matériau rigide parfaitement plastique en déformation plane, Elle permet de calculer les contraintes et les vitesses, c'est-à-dire d'intégrer les équations aux dérivées partielles du problème.

Cette méthode est puissante. Elle fournit des procédés de calcul numérique approché qui sont abordables (les réseaux peuvent être construits, et les calculs faits, à la main). Elle s'applique à un grand nombre de cas du formage des métaux. Elle permet de traiter le cas du matériau non homogène. Elle est développée par Prandtl [28], Hencky[29], Mises [30] et autres, depuis 1920, ensuite elle est généralisée par Mandel [31] en 1962.

II-2 Hypothèse de la méthode des lignes de glissement :

Cette méthode est utilisée pour un matériau rigide, parfaitement plastique homogène et isotrope, en déformation plane. Ce dernier point signifie que si on prend des axes orthonormés Oxyz dont Ox et Oy sont dans le plan de la déformation, alors les composantes U, V, W de la vitesse sont à chaque instant telles que :

$$\begin{cases} U = u(x, y) \\ V = v(x, y) \\ W = 0 \end{cases}$$

C'est-à-dire que l'état du corps est le même le long de toute parallèle à Oz et les vitesses sont toutes parallèles au plan Oxy. Le problème est donc "bidimensionnel".

Donc le tenseur des vitesses de déformation est alors les axes Oxyz:

$$\left[\dot{\xi}_{ij} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [1]$$

Il apparait donc que l'axe Oz est direction principale du tenseur $\left[\dot{\xi}_{ij} \right]$ et donc aussi du tenseur

$\left[\sigma_{ij} \right]$, puisqu'à cause de l'isotropie ces deux tenseurs ont mêmes direction principales, $\sigma_{zz} = \sigma_{III}$ est donc une contrainte principale.

Nous appellerons σ_I et σ_{II} les deux autres contraintes principales qui sont dans le plan Oxy. Le tenseur $\begin{bmatrix} \cdot \\ \sigma_{ij} \end{bmatrix}$ est alors, dans les axes Oxyz, de la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \sigma_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad [2]$$

Pour l'équation du problème bidimensionnel on a les inconnues $[\sigma], \vec{u}, \lambda, (\lambda \geq 0)$ sont solutions du système suivant, pour le critère de Von Mises, en déformation plane :

$$\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2 = k^2 \quad [3] \quad \text{Où } k^2 = \frac{\sigma_0^2}{3}$$

$$\frac{\frac{\partial u}{\partial x}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} = \frac{\frac{\partial v}{\partial y}}{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}}{4\sigma_{xy}} = \frac{\lambda}{2} \quad [4]$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \quad [5]$$

Les équations [3] et [4] sont plus générales que cela [5], en ce sens qu'elles ne sont pas seulement relatives au critère de Von Mises, mais à tout critère plasticité qui ne dépend pas de la contrainte moyenne :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$$

Si on prend un critère quelconque qui ne dépend pas de σ_m , ce qui équivaut à dire qu'il ne dépend que du déviateur des contraintes, et aussi que la déformation plastique se fait sans variation de volume, et c'est le cas en général pour les métaux, on obtient les mêmes équations [3] et [4].

Les contraintes doivent également vérifier les équations d'équilibre suivantes:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad [6]$$

Il faut également se donner, sur le contour du corps; des conditions à la limite, qui pourront porter soit sur les contraintes, soit sur les vitesses, soit sur les deux.

En déformation plane, il n'y a pour le tenseur des contraintes quatre inconnues $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$, que l'on met sous la forme

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}$$

Et qu'on appelle "tenseur des contraintes dans le plan Oxy"

Mais l'équation, ou sa forme plus générale dans le cas d'un critère quelconque, permet de calculer σ_{zz} en fonction de $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$. il ne reste donc que trois inconnues $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$, mais de plus dans les zones où le critère est atteint, l'équation [3] fournit une relation entre σ_{xx}, σ_{xy} et σ_{yy} . Donc on peut calculer une de ces trois inconnues, par exemple σ_{xy} , en fonction des deux autres σ_{xx} et σ_{yy} , et finalement il n'y a que deux inconnues indépendantes σ_{xx} et σ_{yy} .

Or il y a justement deux équations reliant ces deux inconnues : ce sont les deux équations d'équilibre (Où remplace σ_{xy} par son expression en fonction de σ_{xx} et σ_{yy}).

Pour ne pas faire jouer un rôle particulier à σ_{xx} , σ_{yy} ou σ_{xy} on prend pour les deux fonctions inconnues du problème en contraintes:

$$\begin{cases} p = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} = -\frac{\sigma_I + \sigma_{II}}{2} \\ \theta = (\overrightarrow{Mx}, \overrightarrow{M\sigma_I}) \end{cases} \quad [7]$$

$\overrightarrow{\sigma_I}$ Étant la direction de la plus grande traction principale, l'autre direction principale $\overrightarrow{\sigma_{II}}$, qui on le sait, est perpendiculaire à $\overrightarrow{\sigma_I}$ est, par convention, orientée de façon que (figure 16):

$$(\overrightarrow{M\sigma_I}, \overrightarrow{M\sigma_{II}}) = +\frac{\pi}{2}$$

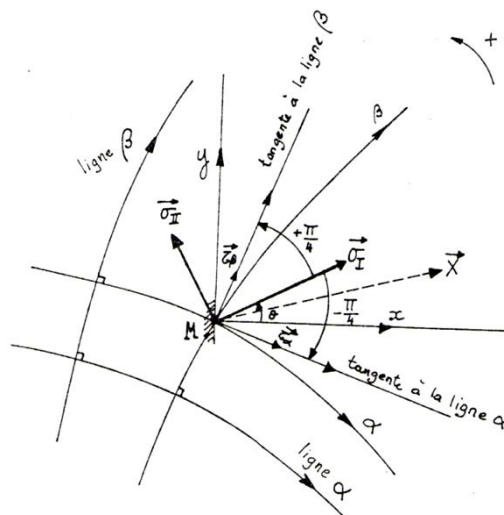


Figure 16 : les directions principales de traction.

- L'examen du cercle de Mohr, (Figure 17) correspondant au plan Oxy (facettes tournant autour de Mz) montre que [32]:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = p + k \sin 2\theta \\ \sigma_{yy} = p - k \sin 2\theta \\ \sigma_{xy} = -k \cos 2\theta \end{cases} \quad [8]$$

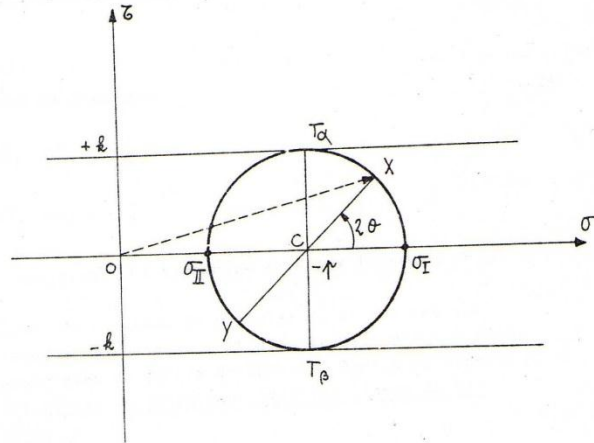


Figure 17 : Cercle de Mohr.

En effet le vecteur contrainte \vec{OX} correspondant à la facette perpendiculaire à \vec{x} son extrémité X sur le cercle de diamètre (σ_{II}, σ_I) et $(C\vec{\sigma}_I, C\vec{X}) = -2(M\vec{\sigma}_I, M\vec{x}) = 2\theta$.

De plus le critère (8), qui équivaut à $\sigma_I - \sigma_{II} = 2k$, montre que le rayon de ce cercle est $k = \text{cst}$.

On reporte l'expression (8) dans les équations d'équilibre (6) et on obtient:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} - 2k \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + 2k \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + 2k \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + 2k \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad [9]$$

C'est un système de deux équations aux dérivées partielles du premier ordre (il n'intervient que des dérivées premières) à deux fonctions inconnues $p(x,y)$ et $\theta(x,y)$ de deux variables x et y .

II-2-1 Relations de Hencky:

Du point de vue mathématique l'équation [9] n'utilise que la notion de dérivée dans une direction donnée, et elle conduit aux résultats suivant:

- 1) Il existe deux réseaux de lignes orthogonales, les lignes α et lignes β , appelées lignes de glissement, qui en tout point bissectent l'angle des contraintes principales σ_I et σ_{II}

Par convention, les orientations sont les suivantes: $(M\vec{\sigma}_I, M\vec{\alpha}) = -\frac{\pi}{4}$

Donc $(M\vec{\alpha}, M\vec{\beta}) = +\frac{\pi}{2} (M\vec{\sigma}_I, M\vec{\beta}) = +\frac{\pi}{4}$

Où $M\vec{\alpha}$ et $M\vec{\beta}$ désignent les tangentes en M aux lignes α et β .

Considérons les facettes de normales $M\vec{\alpha}$ et $M\vec{\beta}$. Les vecteurs contraintes correspondants sont $OT\vec{\alpha}$ et $OT\vec{\beta}$ (Figure 3) d'après les propriétés du cercle de Mohr. Donc on voit que les lignes de glissement sont les lignes de cisaillement maximal k .

- 2) le long de ces lignes α et β , on a les relations suivantes entre les deux fonctions inconnues $p(x, y)$ et $\theta(x, y)$, relations dites de Hencky:

$$\begin{aligned}
 p + 2k\theta &= \text{cste} \quad \text{le long d'une ligne } \alpha \\
 p - 2k\theta &= \text{cste} \quad \text{le long d'une ligne } \beta
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

II-2-2 Utilisation des relations de Hencky:

La relation de Hencky est utilisée pour calculer p et θ , Si on donne le réseau des lignes de glissement, on connaît θ partout puisque :

$$\theta = (M\vec{x}, M\vec{\sigma}_I) = \underbrace{(M\vec{x}, M\vec{\alpha})}_{\text{connu}} + \frac{\pi}{4}$$

Donc si on se donne p en un point M , p est aussitôt connu tout le long des lignes α et β qui passent par M .

II-2-3 Propriété géométrique du réseau des lignes de glissement. Théorème de Hencky:

Prenons un couple quelconque de lignes α et un couple quelconque de lignes β . Elles se coupent en $MNPQ$ (figure 18).

En écrivant les équations aux quatre points $MNPQ$ et en éliminant les valeurs de p , on trouve:

$$\theta(N) - \theta(M) = \theta(Q) - \theta(P) \Leftrightarrow (\vec{\tau}_\alpha(M), \vec{\tau}_\alpha(N) = \vec{\tau}_\alpha(P), \vec{\tau}_\alpha(Q))$$

C'est-à-dire que l'on a le théorème de Hencky:

L'angle dont tourne la tangente à une ligne α entre deux lignes β données, est le même quelle que soit la ligne α envisagée. On peut permuter les rôles de α et de β .

Un tel réseau de courbes est dit réseau de Hencky. Une conséquence immédiate est que si MN est un segment de droite, il est de même de tous les arcs de lignes α compris entre β et β' .

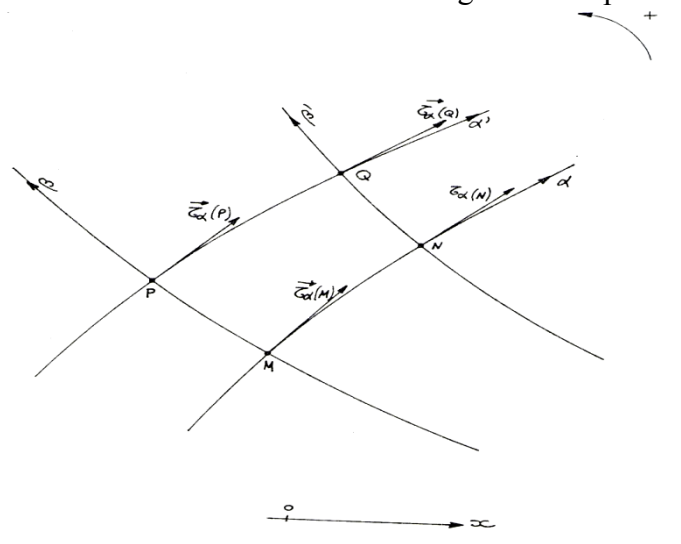


Figure 18 :Propriété géométrique du réseau des lignes de glissement.

II-3 Construction du réseau des lignes de glissement :

On peut construire ce réseau par une méthode numérique ou graphique approchée et calculer la solution p et θ sur ce réseau par les relations de Hencky.

- **Première Méthode:**

Il est souvent appelé "première problème aux limites"

On se donne deux arcs de lignes de glissement OA et OB (Figure 19-a). Le champ des lignes de glissement est alors parfaitement déterminé dans le rectangle curviligne OACB.

On peut calculer ce champ de façon approchée de la manière suivante:

On découpe OA et OB en petits arcs tels que OP, PT, etc. et OQ, QW, etc. les lignes α et β passant par ces points de subdivision forment un "quadrillage" de OACB.

Or le théorème de Hencky nous permet de calculer immédiatement les valeurs de θ en tous les points R, S, V, Z... du quadrillage (remarquons que la position de ces points n'est pas encore connue), car on a, par exemple:

$$\theta(R) - \theta(Q) = \theta(P) - \theta(O)$$

D'où $\theta(R)$ puisque θ est connu le long de OA et de OB.

On détermine alors la position du point R de la façon suivante:

On construit R comme intersection des deux cordes QR et PR (figure 19-b) et on assimile les petits arcs de lignes α et β

\overline{QR} Et \overline{PR} à des arcs de cercle; ce qui permet d'écrire:

$$(\overline{OX}, \overline{QR}) = \frac{(\overline{OX}, \overline{R\alpha}) + (\overline{OX}, \overline{Q\alpha})}{2}$$

Où $\overline{R\alpha}$ et $\overline{Q\alpha}$ sont les tangentes en R et Q à la ligne α . Donc:

$$(\overline{OX}, \overline{QR}) = \frac{\theta(R) + \theta(Q)}{2} - \frac{\pi}{4} = \text{quantité connue.}$$

Donc on peut construire les deux droites QR et PR, d'où R à leur intersection.

De proche en proche, on peut construire tous les points du quadrillage, donc le réseau de lignes α et β dans OACB.

Si maintenant on connaît la valeur de p en O, on calcule p le long d'OA et OB grâce aux relations de Hencky et ensuite on calcule de même p dans tout le réseau OACB.

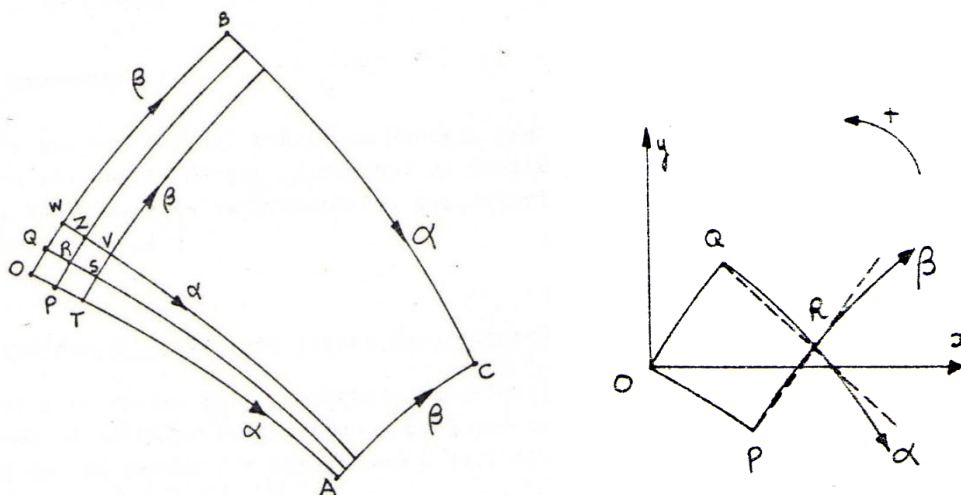


Figure 19 : Construction des lignes de glissement pour première problème aux limites.

- **Deuxième Méthode:**

Il est souvent appelé "deuxième problème aux limites".

On suppose connues les valeurs de p et θ , par exemple à l'aide des conditions aux limites, le long d'un arc de courbe AB, qui n'est pas une ligne de glissement.

Alors le réseau des lignes de glissement est parfaitement déterminé dans le triangle curviligne ABM, construit avec les deux lignes de glissement issues de A et B qui convergent du côté voulu de AB. Pour cette raison ce triangle s'appelle le "domaine de dépendance" de AB.

On peut construire le réseau de façon approchée par une méthode tout à fait semblable à la précédente:

On découpe AB en petits arcs tels que CD, ce qui produit un "quadrillage" du triangle ABM. En tout point de ce quadrillage on connaît la valeur de θ grâce aux relations de Hencky et aux données sur AB. Par exemple pour R on a :

$$\begin{cases} p(R) + 2k\theta(R) = p(C) - 2k\theta(C) \\ p(R) - 2k\theta(R) = p(D) + 2k\theta(D) \end{cases} \quad [11]$$

Système de deux équations linéaires à deux inconnues $p(R)$ et $\theta(R)$, que l'on résout.

La connaissance de $\theta(R)$ permet de déterminer comme précédemment la position du point R. d'où le réseau de lignes α et β . La connaissance de p pour le réseau est déjà acquise par la résolution du système [11].

II-4 Equation de Geiringer[33] :

II-4-1 Propriétés des lignes de glissement du point de vue des vitesses :

On suppose que l'on connaît le champ des contraintes et son réseau de lignes de glissement α et β .

Les équations pour les vitesses sont alors les équations [4] qui traduisent la loi de comportement du matériau.

On a vu que les lignes de glissement α et β jouent un rôle tout à fait particulier. Pour cette raison on est convenu de repérer le vecteur vitesse \vec{u} au point M par ses composantes v_α et v_β sur les tangentes aux lignes α et β passant par M (Figure 22) (et non pas ses composantes u et v sur les axes Ox et Oy).

Pour cela, on change d'axes et on prend comme nouveaux axes MX et MY orthogonaux, portés par les tangentes orientées en M aux lignes α et β (Figure 20).

Dans ces nouveaux axes MX, MY, le tenseur des vitesses devient (en faisant $\theta = (M\vec{x}, M\vec{\sigma}_I) = \frac{\pi}{4}$) dans les relations [8] du cercle de Mohr (figure 17):

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p & k \\ k & -p \end{bmatrix} \text{ Donc } \sigma_{XX} - \sigma_{YY} = 0$$

Et les relations [4] donnent pour le tenseur des vitesses de déformation $[\dot{\epsilon}]$,

Toujours dans les axes MX, MY :

$$[\dot{\epsilon}] = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{XX} & \dot{\epsilon}_{XY} \\ \dot{\epsilon}_{XY} & \dot{\epsilon}_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \lambda k \\ \lambda k & 0 \end{bmatrix}$$

Donc $\dot{\epsilon}_{XX}$ et $\dot{\epsilon}_{YY}$ qui sont les vitesses de dilatation dans les directions X et Y, c'est-à-dire dans les directions α et β , sont nulles.

La vitesse de dilatation (également appelée: taux d'allongement relatif), le long d'une ligne de glissement, est nulle.

Par ailleurs la condition $\lambda \geq 0$ se traduit ici par : $\dot{\epsilon}_{XY} \geq 0$

Il est commode d'exprimer $\dot{\epsilon}_{XX}$, $\dot{\epsilon}_{XY}$ et $\dot{\epsilon}_{YY}$ à l'aide des composantes de la vitesse v_α et v_β , sur les axes X et Y en chaque point.

Les valeurs trouvées pour $\dot{\epsilon}_{XX}$, $\dot{\epsilon}_{XY}$ et $\dot{\epsilon}_{YY}$ sont indiquées ici pour mémoire, car elles donnent immédiatement les équations qui permettent de résoudre le problème des vitesses et qu'on appelle équations de Geiringer:

$$\dot{\epsilon}_{XX} = \frac{\partial v_\alpha}{\partial \tau_\alpha} - v_\beta \frac{\partial \theta}{\partial \tau_\alpha} = 0 \quad [12]$$

$$\dot{\epsilon}_{YY} = \frac{\partial v_\beta}{\partial \tau_\beta} + v_\alpha \frac{\partial \theta}{\partial \tau_\beta} = 0 \quad [13]$$

$$\dot{\epsilon}_{XY} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\alpha}{\partial \tau_\beta} - v_\beta \frac{\partial \theta}{\partial \tau_\beta} + \frac{\partial v_\beta}{\partial \tau_\alpha} + v_\alpha \frac{\partial \theta}{\partial \tau_\alpha} \right) \geq 0 \quad [14]$$

Les équations [12] et [13] sont des équations différentielles ordinaires le long des lignes α et β :

Equations de Geiringer :

$$dv_\alpha - v_\beta d\theta = 0 \text{ le long d'une ligne } \alpha \quad [15]$$

$$dv_\beta + v_\alpha d\theta = 0 \text{ le long d'une ligne } \beta$$

Et l'inégalité [14] et la " condition de puissance dissipée positive".

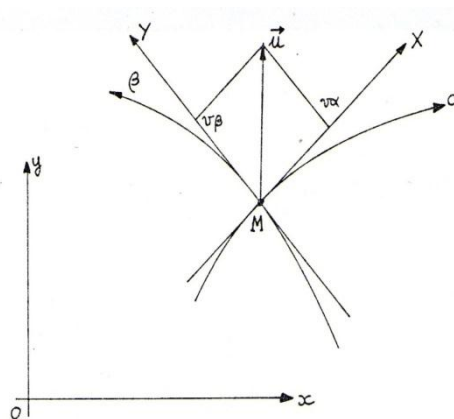


Figure 20: Les composantes v_α et v_β sur les tangentes aux lignes α et β

II-4-2 Utilisation des équations de Geiringer:

Si le réseau des lignes de glissement est connu, ces équations permettent de calculer les vitesses à partir des conditions à la limite.

Dans les deux méthodes cités (1^{er} et 2^{ème} problèmes aux limites) il ne s'agit plus de construire le quadrillage des lignes de glissement qu'on suppose ici connu; mais le principe de calcul des valeurs de v_α et v_β de proche en proche en tous les points du maillage est sensiblement le même. Les équations de Geiringer [15] remplacent ici les équations de Hencky [10], discrétisées où les dérivées sont remplacées par les différences finies, le principe de la méthode est de calculer les valeurs de v_α et de v_β au point R connaissant cette valeur aux points voisins P et Q.

Ceci se fait grâce aux équations [15] discrétisées:

$$\begin{cases} v_\alpha(R) - v_\alpha(P) - v_\beta(\theta(R) - \theta(P)) = 0 \\ v_\beta(R) - v_\beta(P) + v_\alpha(\theta(R) - \theta(Q)) = 0 \end{cases}$$

C'est un système de deux équations linéaires à deux inconnues $v_\alpha(R)$ et $v_\beta(R)$, système qu'on résout.

II-5 Types de réseaux de lignes de glissement particulières :

a) Champ homogène:

Les lignes α et les lignes β sont des droites orthogonales. Alors θ est constante par tout donc p aussi. Le champ des contraintes est homogène.

b) Champ semi-homogène:

Une famille de ligne de glissement, α par exemple, est une famille de portions de droites. Les lignes β sont leurs "trajectoires orthogonales". Par exemple, l'éventail de Prandtl où les lignes α sont des rayons issus d'un point O (qui est un point singulier), et les lignes β sont des cercles de centre O (figure 21)

Si on connaît un champ de lignes de glissement dans deux régions du plan et si ces deux champs se raccordent de façon continue, alors ils se raccordent le long d'une ligne de glissement. Donc un champ homogène ne peut être raccordé qu'à un champ semi-homogène.

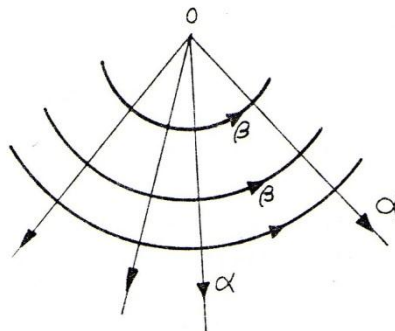


Figure 21 :l'éventail de Prandtl

II-6 Hodographe:

Le plan de l'hodographe est un plan rapporté par exemple aux axes $\Omega\vec{u}$ et $\Omega\vec{v}$, où on porte à partir de l'origine Ω un vecteur $\Omega\vec{m}$ égal au vecteur vitesse \vec{u} en M (M est un point du matériau, appartenant à ce qu'on appelle le plan physique). Son extrémité est m (Figure 22).

Quand M décrit une ligne α , m décrit une ligne $\tilde{\alpha}$.

Quand M décrit une ligne β , m décrit une ligne $\tilde{\beta}$.

Comme la vitesse de dilatation le long d'une ligne de glissement est nulle, les directions de $\tilde{\alpha}$ et de $\tilde{\beta}$ aux points m et M sont les mêmes, (car elles sont toutes deux orthogonales à la direction α). Il en est de même pour les directions $\tilde{\beta}$ et α . Par contre les orientations peuvent être différentes.

Donc le réseau $\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}$ est aussi un réseau de Hencky.

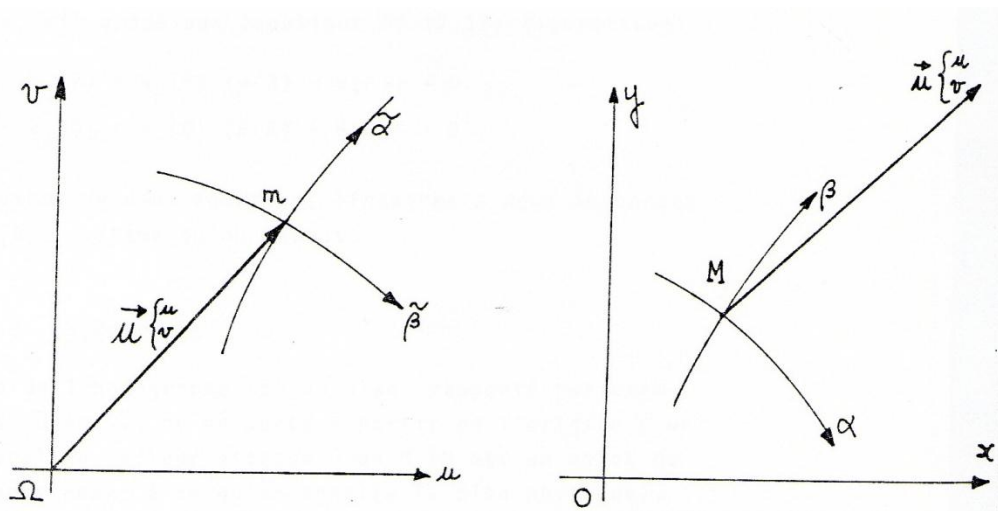


Figure 22 : les composantes de le vecteur vitesse aux points M, m.

II-7 Lignes de discontinuité de vitesse:

Ce sont des lignes à travers lesquelles le vecteur vitesse est discontinu. On en rencontrera souvent. Donnons leurs propriétés:

Ce sont nécessairement des lignes de glissement

La composante normale de la vitesse est continue (du fait de l'incompressibilité de la déformation plastique)

Donc si la ligne de discontinuités est une ligne α , on a $[v_\beta]=0$. De plus les équations [15] donnent $[v_\beta]=cst$ le long de la ligne α , et la condition de puissance dissipée [14] donne $[v_\beta] \geq 0$ si on traverse dans le sens de β . On peut permuter les rôles de α et de β . Le symbole $[v_\beta]$ représente la discontinuité de v_β .

II-8 Synthèse sur l'utilisation de la méthode des lignes de glissement:

Dans la pratique, la méthode du champ des lignes de glissement s'utilise souvent de la façon suivante:

A partir des conditions à la limite sur les contraintes, on construit, un champ de lignes de glissement et on calcule le champ des contraintes correspondant.

Dans la construction de champ, on dispose en générale d'un certain arbitraire (par exemple la forme d'une ligne de glissement "initiale"). Puis, à partir de certaines conditions à la limite sur les vitesses, on calcule, sur ce champ de lignes de glissement, un champ de vitesses associé et on regarde si ce champ de vitesses calculé satisfait à toutes les conditions à la limite sur les vitesses.

Si ce n'est pas le cas, on modifie le champ des lignes de glissement et on recommence jusqu'à ce que soit le cas.

Alors on vérifie que la puissance dissipée est partout positive ou nulle (équation [14]).

Puis on vérifie que les zones non déformées peuvent "tenir", c'est-à-dire que l'on peut trouver dans ces zones un champ de contraintes satisfaisant aux équations d'équilibre, aux conditions à la limite, équilibrant les forces exercées par les zones déformées sur ces zones non déformées, et ne violant nulle part le critère de plasticité (c'est pourquoi on dit que la zone non déformée "tient").

On dit alors qu'on a une solution complète. Sinon, on a une solution incomplète et il faut modifier le champ des lignes de glissement.

CHAPITRE III

III-1 Caractérisation des matériaux utilisés :

Nous n'avons pu acquérir qu'un seul matériau avec différentes épaisseurs, à savoir celle d'Arcelor Mittal Annaba que nous avons sélectionné pour l'étude expérimentale: Tôle acier XC52 laminée à froid (standard API 5 L). Le matériau a été testé au laboratoire de Mécanique des solides du département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.

Dans ces essais de caractérisation (essai de traction) on utilise une machine de traction et compression assistée par ordinateur (HOYTON-S-L), avec éprouvette de traction découpée selon la norme ASTM E08 dans le sens de laminage (0°) et transversal (90°). Pour déterminer l'allongement (A%) on utilise un extensomètre à couteaux de base de mesure 50 mm et d'allongement 2%.

III-2 Description de l'appareillage utilisé :

III-2-1 Machine utilisée :

Pour pouvoir faire les expériences, on a utilisé la machine HOYTON-S-L. C'est une machine d'essai universelle pour traction et compression ayant une capacité de charge de 100 KN. Elle est assistée par ordinateur, ce dernier est muni d'un logiciel appelé HOYWIN. Ce logiciel est installé pour piloter la machine numériquement, ainsi qu'il nous donne directement toutes les informations concernant l'essai en question à savoir: l'identification de l'essai, les paramètres de l'éprouvette, et les résultats de l'essai (charge maximale, résistance à la rupture, charge à la limite d'élasticité conventionnelle, l'allongement A%) et le tracé du diagramme de traction.

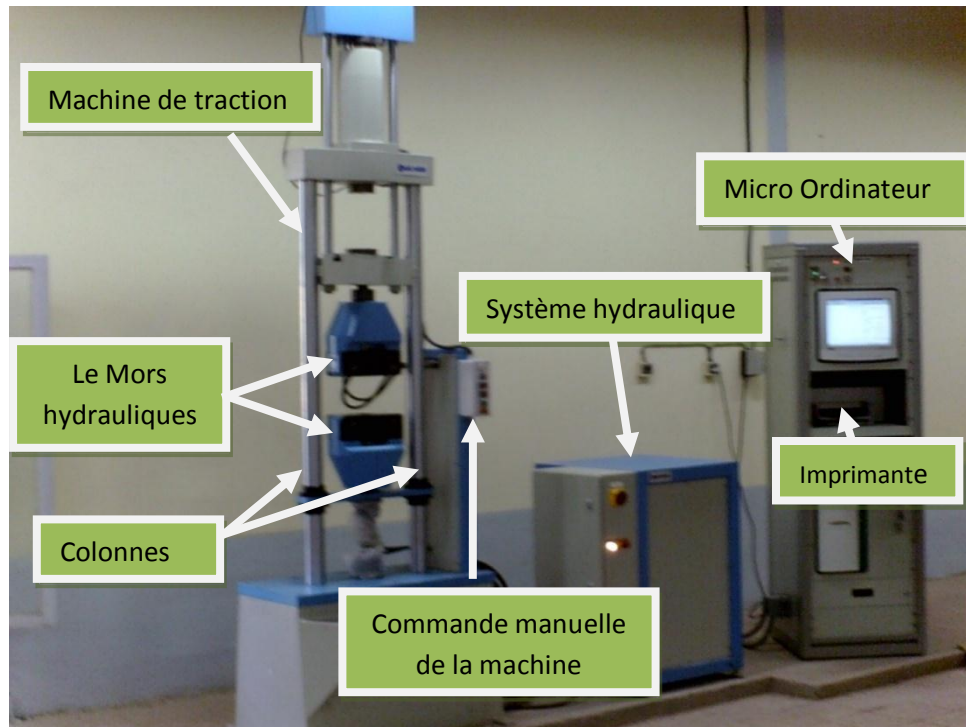


Figure 23: Machine d'essai universelle assistée par ordinateur (HOYTON-S-L).

III-2-2 Extensomètre:

L'extensomètre est un dispositif permettant de mesurer le déplacement directement sur la partie utile de l'éprouvette (i.e. où l'état de contrainte est homogène). Cela permet d'obtenir une mesure plus précise que par la mesure du déplacement de la traverse. Il existe deux types d'extensomètre: avec ou sans contact; on choisira l'un ou l'autre selon les conditions expérimentales. Il est possible également de mesurer la variation de section d'une éprouvette pour évaluer le coefficient de Poisson. A cet effet on utilise un extensomètre à couteaux (EXT-502.100/03) lié avec le micro-ordinateur à l'aide d'un câble data. La distance entre les deux couteaux est de 50 mm, l'un des couteaux fixe et l'autre mobile (figure 24).

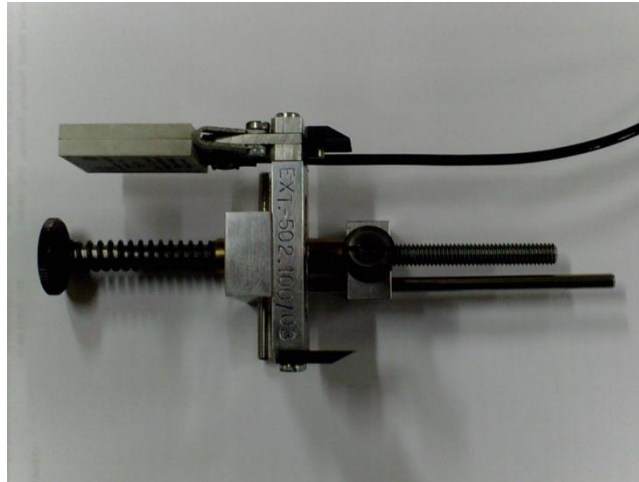


Figure 24: Extensomètre.

III-2-3 Epreuve de traction pour la Tôle:

Pour l'éprouvette de traction, la section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contraintes excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes. Mais pour les tôles minces on peut annuler les têtes d'amarrage pour éviter la concentration des contraintes au niveau des rayons de courbures. La figure suivante représente une éprouvette de traction (ASTME08M) [34].

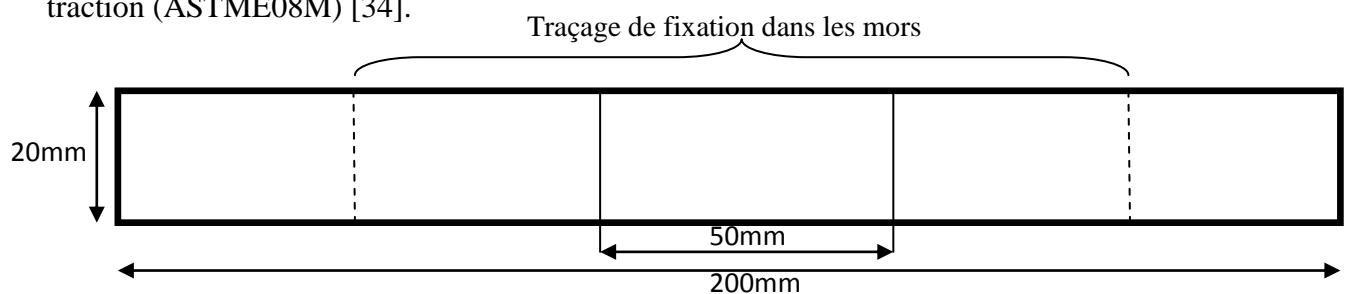


Figure 25: Epreuve utilisée pour l'essai de traction.

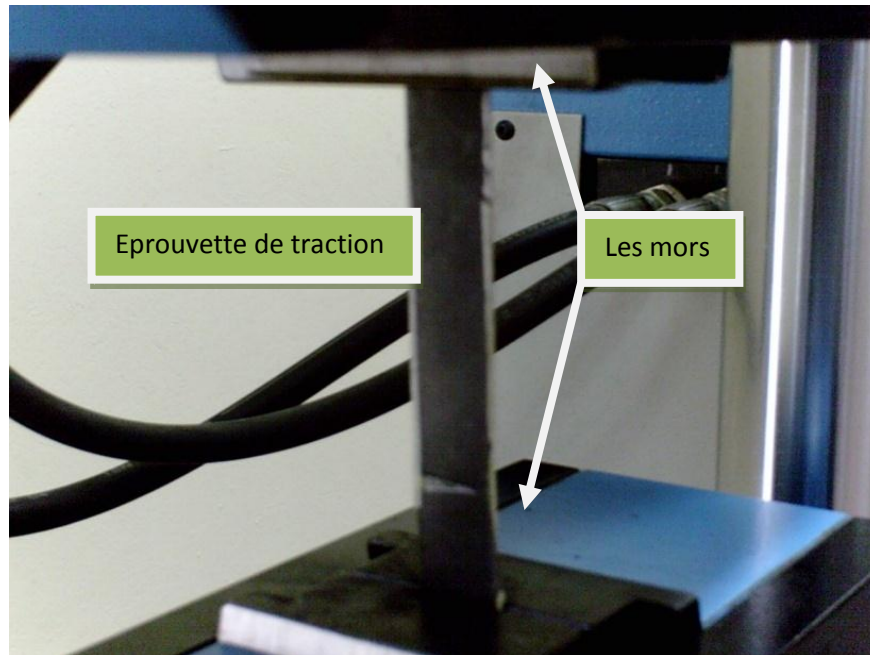


Figure 26: Eprouvette de traction entre les mors.

III-3 Procédé expérimental :

Pour déterminer expérimentalement les caractéristiques mécaniques du matériau, on a réalisé des essais de traction pour le matériau avec les différentes épaisseurs (1 mm, 0.7 mm, 0.5 mm) dans le sens du laminage et dans le sens transversal sur la machine d'essai universelle pour traction.

Les éprouvettes sont découpées au niveau du laboratoire du mécanique des solides (LMS), vu que n'avons pu avoir une scie à ruban, nous avons découpé les éprouvettes à l'aide d'une cisaille de tôles à lames. En faisant attention aux défauts de la tôle dans la zone de découpage, pour pallier à différentes erreurs nous avons réalisé trois essais pour chaque type d'épaisseur à savoir même matériau et même épaisseur, Les dimensions des éprouvettes sont: 200 mm x 20 mm x épaisseur (1 mm, 0.7 mm, 0.5 mm) avec base de mesure de 50 mm. La mise en place de l'éprouvette dans les mors est facilitée par un tracé préalable de traits distants de l'extrémité de l'éprouvette.

A partir du logiciel servant pour l'acquisition des données nous obtenons les résultats qui sont en annexe (1), et résumés dans les figures ci-dessous dans les deux sens de laminage à savoir longitudinal (0°) et transversal (90°).

En voit que les courbes (les trois essais pour différentes épaisseurs) sont composés de trois domaines.

Zone élastique : domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire), si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales

Zone d'écrouissage : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone de rupture: la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en valeur de rupture. Les allongements croissent avec une diminution de la charge.

Le module d'Young est calculé à partir des courbes de traction que nous présentons.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Les courbes et les tableaux ci-dessous présentent les différentes caractéristiques mécaniques du matériau :

- Tôle d'épaisseur de 0.5 mm dans le sens de laminage:

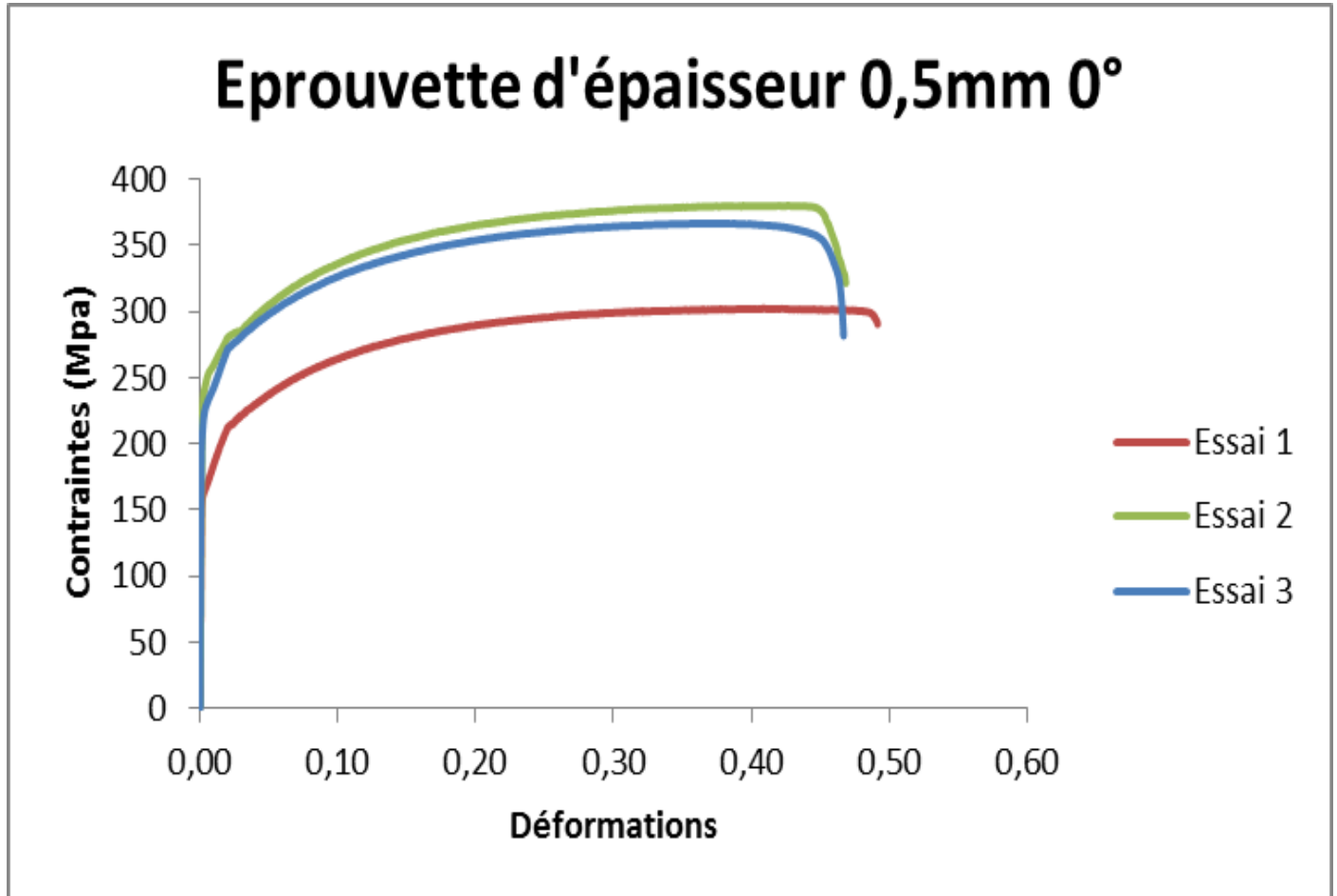


Figure 27: Courbe de traction pour la tôle d'épaisseur 0.5 mm dans le sens du laminage

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
F_{\max} (N)	3023.228	3800.424	3667.264
F_{rup} (N)	2904.726	3214.918	3032.152
σ_e (N/mm ²)	212.7567	280.9222	281.6276
E(GPa)	222.045	213.646	225.190

Tableau 1 : Les grandeur F_{\max} , F_{rup} , σ_e , E pour l'épaisseur 0.5mm dans le sens du laminage

Les courbes ci-dessus représentent les courbes de traction pour tôle d'épaisseur 0.5 mm dans le sens du laminage, on note que les courbes des trois essais sont presque identiques sauf au moment de la rupture, avec une légère différence pour l'essai 1, dû certainement à un défaut de l'éprouvette de traction durant le découpage.

- Tôle d'épaisseur 0.5 mm dans le sens transversal du laminage :

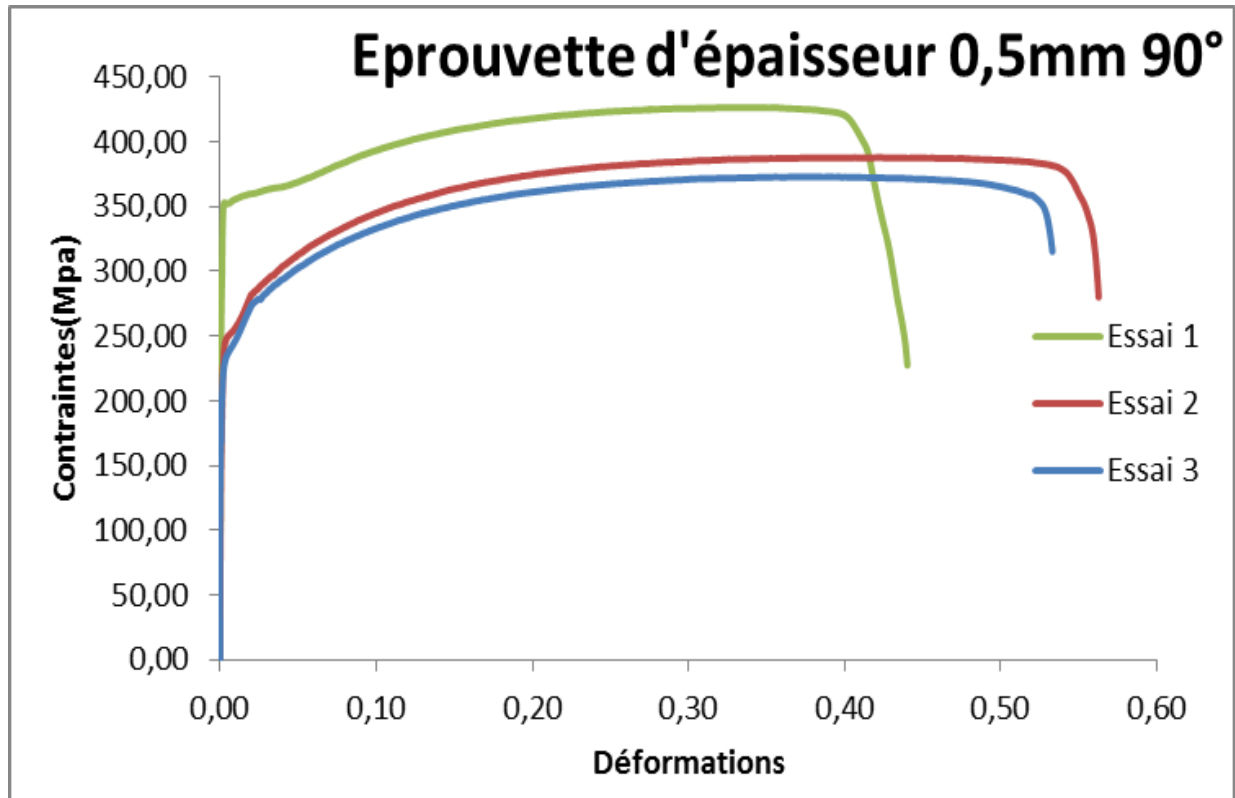


Figure 28: courbe de traction pour tôle d'épaisseur 0.5 mm dans le sens transversal du laminage

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$F_{max}(N)$	4263.938	3878.54	3729.885
$F_{rup}(N)$	227.5044	2800.358	3152.907
$\sigma_e (N/mm^2)$	359.9731	282.4882	273.3777
$E(GPa)$	225.241	218.635	220.865

Tableau 2 : les grandeur F_{max} , F_{rup} , σ_e , E pour la tôle d'épaisseur 0.5mm dans le sens transversal du laminage

La figure 28 représente courbes de traction pour la tôle d'épaisseur de 0.5 mm dans le sens transversal du laminage, elle montre que les courbes ont la même forme avec une légère différence pour l'essai 1.

- Tôle d'épaisseur de 0.7 mm dans le sens du laminage:

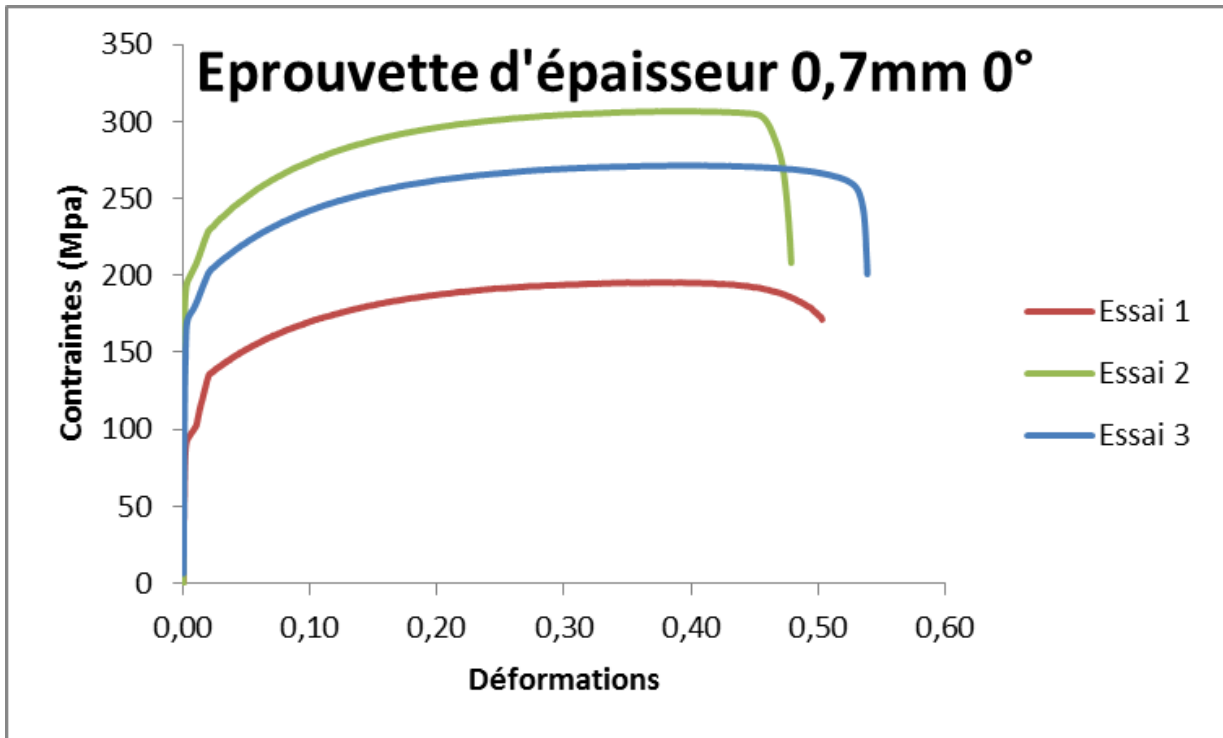


Figure 29: Courbe de traction pour tôle d'épaisseur de 0.7 mm dans le sens du laminage

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$F_{max}(N)$	2738.393	4291.977	3798.905
$F_{rup}(N)$	2398.46	2914.728	2812.652
$\sigma_e (N/mm^2)$	135.4639	229.5589	202.1818
$E(GPa)$	219.658	219.295	226.354

Tableau 3 : les grandeur F_{max} , F_{rup} , σ_e , E pour tôle d'épaisseur 0.7 mm dans le sens du laminage

La figure 29 représente les courbes de traction pour la tôle d'épaisseur 0.7 mm dans le sens du laminage, on note que les courbes sont presque identiques avec une petite différence pour l'essai 1 pour la limite élastique.

- Tôle d'épaisseur 0.7 mm dans le sens transversal du laminage:

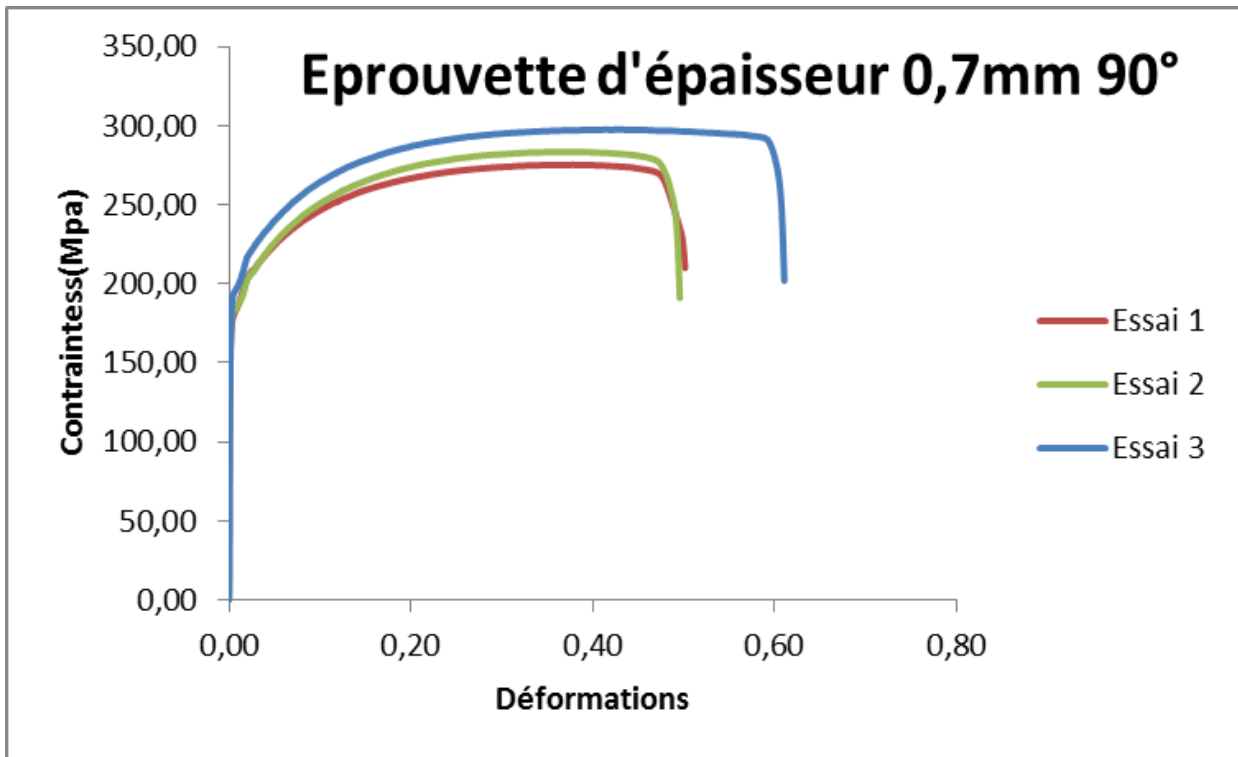


Figure 30: courbe de tarction pour tôle d'épaisseur de 0.7mm à transversal au sens de laminage.

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
F_{\max} (N)	3852.896	3966.491	4165.848
F_{rup} (N)	2939.292	2976.51	3198.09
σ_e (N/mm ²)	204.1597	202.9265	217.1036
E(GPa)	225.989	224.507	226.458

Tableau 4 : les grandeurs F_{\max} , F_{rup} , σ_e , E pour épaisseur de 0.7 mm dans le sens transversal du laminage

La figure ci-dessus 30 représente les courbes de traction pour la tôle d'épaisseur de 0.7 mm dans le sens transversal du laminage, on voit que les courbes sont identiques pour les trois essais.

- Tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens du laminage :

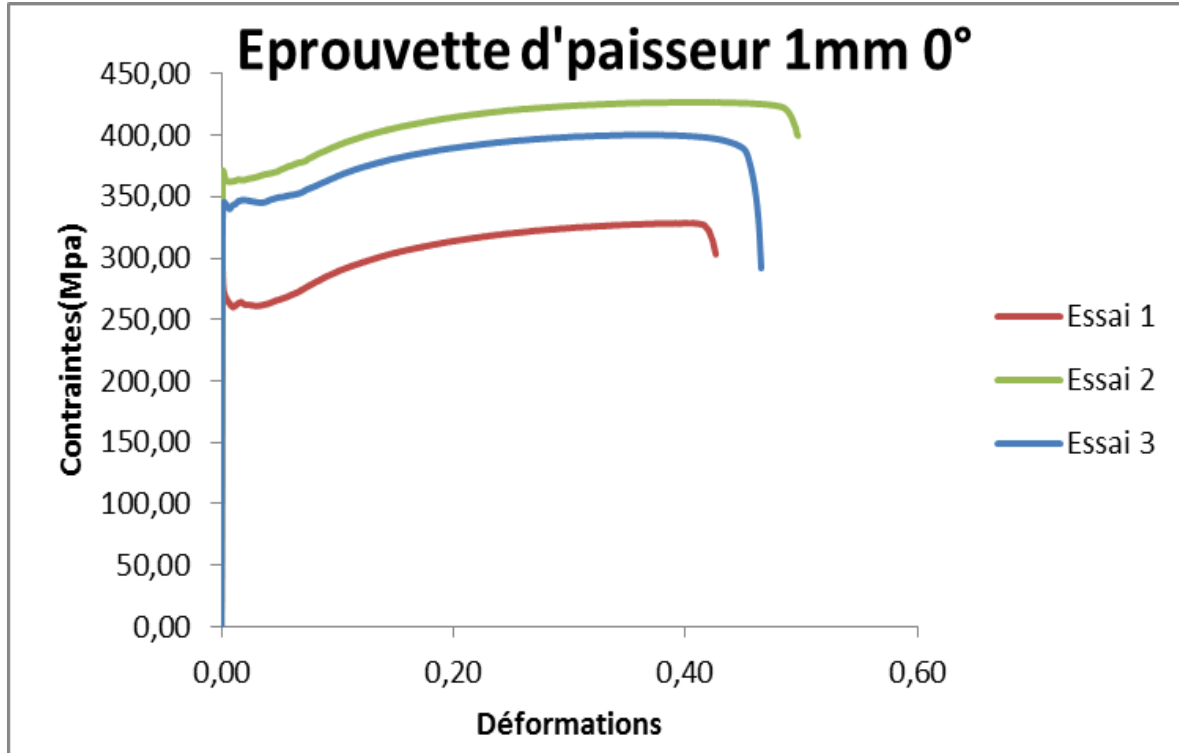


Figure 31: courbe de tarction pour la tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens du laminage

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
F_{\max} (N)	6569.111	8536.842	8006.163
F_{rup} (N)	6063.441	7994.738	5837.229
σ_e (N/mm ²)	261.849	363.8762	347.2258
E(GPa)	243.9	221.704	223.654

Tableau 5 : les grandeurs F_{\max} , F_{rup} , σ_e , E pour la tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens du laminage

On voit bien que dans la figure 31 qui représente les courbes de traction pour la tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens du laminage, les courbes ont même forme avec une pic suivi d'un palier.

- Tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens transversal du laminage:

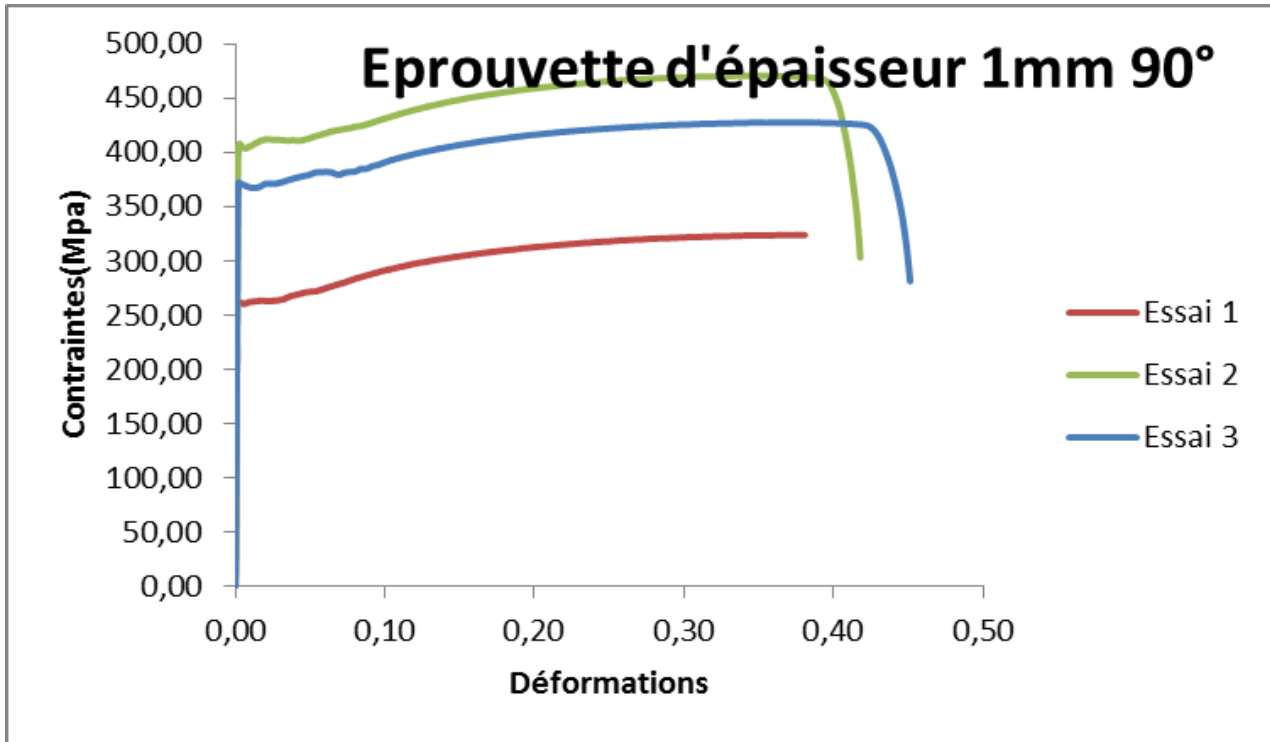


Figure 32: courbe de tarction pour tôle d'épaisseur de 1mm à transversal au sens de laminage.

Essais Grandeurs	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$F_{max}(N)$	6474.257	9410.571	8549.014
$F_{rup}(N)$	6474.257	6822.624	5623.586
$\sigma_e (N/mm^2)$	262.6871	411.8783	371.081
$E(GPa)$	220.694	225.482	228.999

Tableau 6 : les grandeurs F_{max} , F_{rup} , σ_e , E pour tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens transversal du laminage

La figure 32 représente les courbes de traction pour la tôle d'épaisseur 1 mm dans le sens transversal du laminage, les courbes ont même forme avec une pic suivi d'un palier. Sauf dans l'essai 1 ou la charge de rupture est égale à la charge maximale.

III-4 Essai d'emboutissage :

L'essai de l'emboutissage est fait pour déterminer le comportement du matériau (XC52) pendant la mise en forme, de même pour déterminer l'amincissement de la tôle (même matériau avec différentes épaisseurs). Pour cela on utilise la machine de traction (HOYTON-S-L) qui permet de sauvegarder les données de l'essai. Un module d'emboutissage constitué du poinçon, matrice et serre flan, est posé sur le mors mobile de la machine, le poinçon est fixé sur la partie fixe de la traverse du haut. Après la déformation de la tôle nous mesurons l'épaisseur dans des points indiqués préalablement (mesure de l'épaisseur dans des points avant et après essai) avec un mesureur d'épaisseur (DM4 DL). En utilisons aussi les jauges bidimensionnelles ($k=0.995$) pour déterminer les déformations. Les dimensions L1, L2, L3, S1, S2, S3 sont des longueurs de la tôle déformée.

III-4-1 Présentation du matériel utilisée

III-4-1-1 Machine utilisée :

La machine utilisée pour faire nos essais d'emboutissage est la machine HOYTON-S-L pilotée par micro-ordinateur la même qui avec laquelle nous avons fait les essais de traction pour caractériser le matériau. Pour les essais d'emboutissage, la cellule de charge est placée sous la traverse mobile afin que l'on puisse travailler en compression.

III-4-1-2 Modèle d'emboutissage utilisé:

Un montage à poinçon fixe et à matrice mobile est réalisé. La matrice et le serre flan sont mobiles avec diamètre extérieur de 250 mm et diamètre intérieur de 120 mm, ils sont reliés au mors (mobile) de la machine de traction. La tôle à emboutir est placée entre la matrice et le serre flan qui sont solidarités par huit vis H (M8/40). Au cours du mouvement de descente, la tôle vient s'emboutir sur le poinçon qui est fixe. Les efforts sont essentiellement axiaux. En effet, les efforts radiaux et transversaux ainsi que les moments sont négligeables. Donc, seuls les efforts axiaux pour tous les calculs de dimensionnement de la structure sont pris en compte. Ce module a été réalisé par S. Ellagoune et M. Boivin [35] dans leurs travaux de recherche et où nous avons utilisé un montage semblable pour nos essais.

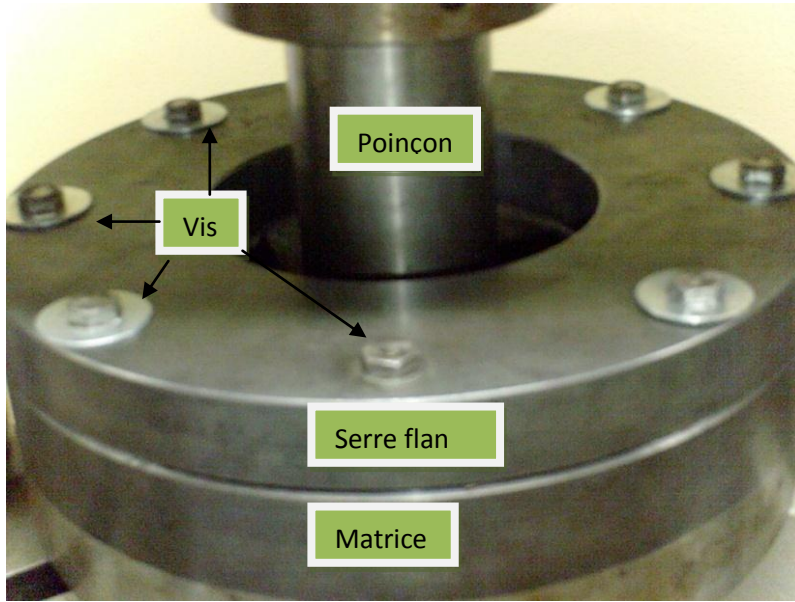


Figure 33: Modèle d'emboutissage.

La figure suivante représente un dessin descriptif du modèle d'emboutissage. Le poinçon est de forme du cylindre de diamètre 60 mm et de profondeur 120 mm. Le serre flan et la matrice sont de forme de cylindriques creuses de diamètre extérieur 250 mm, diamètre intérieur 120 mm.

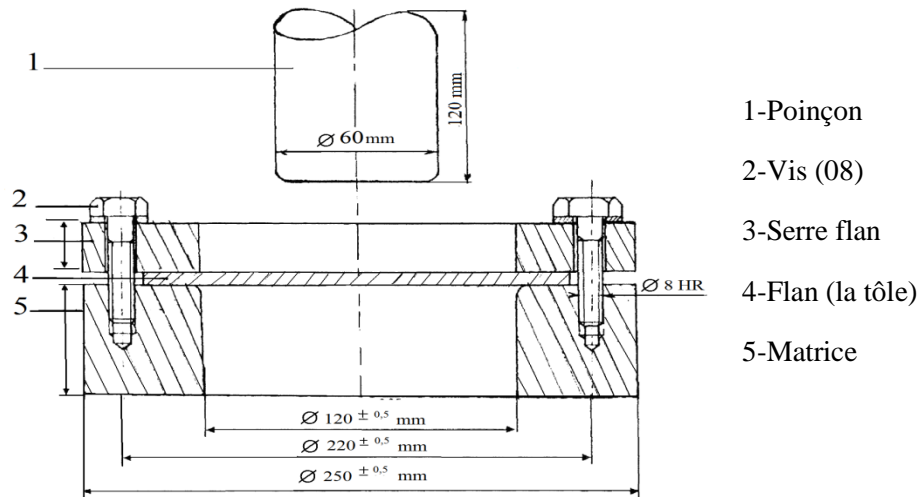


Figure 34: Dessin du Modèle d'emboutissage.

III-4-1-2 Mesureur de l'épaisseur:

Le DM4 DL est un mesureur d'épaisseur ultrasonique portable. Il est spécialement applicable à la mesure d'épaisseur des tôles, tuyaux, tubes, tuyaux sous pression et autres pièces et toutes les diminutions d'épaisseur. L'enregistreur des données (DATA LOGGER) intégrées du DM4DL améliore la sûreté des enregistrements des lectures d'épaisseur en évitant toute erreur de lecture ou d'enregistrement de dossier. Un total de 2.679 lectures peuvent être enregistrées par la simple pression de la touche SEND. Les statistiques données sont transmises par le port série I/O, à une imprimante 80 colonnes ou à un PC.



Figure 35: mesureur d'épaisseur DM4 DL

III-4-1-3 Préparation des tôles :

Pour les tôles de l'emboutissage, nous choisîmes les dimensions suivantes: longueur 240 mm, largeur 60 mm et l'épaisseur (0.5, 0.7, 1) mm. Les éprouvettes découpées au niveau du (LMS) avec une cisaille suivant le sens de laminage. Après le découpage on a tracé les éprouvettes pour coller les jauges et pour mesurer l'épaisseur au niveau des points. La figure suivante représente l'éprouvette de l'emboutissage :

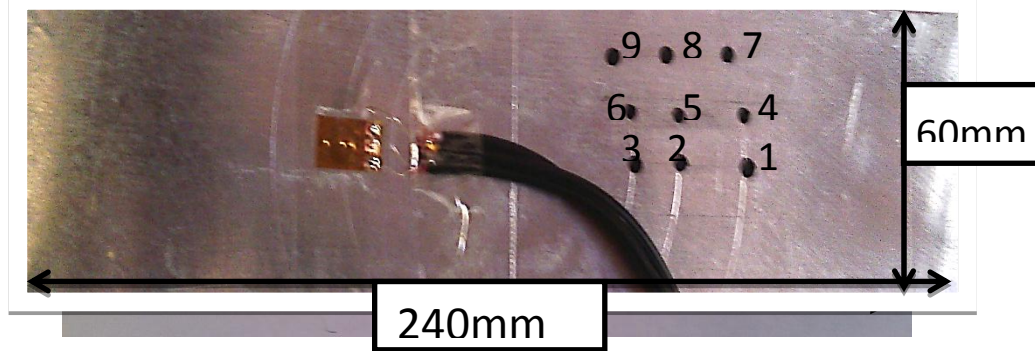


Figure 36: Epreuve d'emboutissage.

III-4-2 Mesure des déformations par jauges d'extensomètre.

III-4-2-1 Description du matériel utilisé :

Tôles minces d'acier de dimensions nominales 240 mm x 60 mm x épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm).

- Jauges bidimensionnelles de factor $k= 0.995$ (une rosette à 0°)
- Fer à souder, fils, solvants et colle (super glue OHO)
- Multimètre numérique.
- Règle, pied à coulisse.

III-4-2-2 Principe des jauges

Sous sa forme la plus simple, une jauge est constituée d'un fil très fin (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la figure (37). Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée.

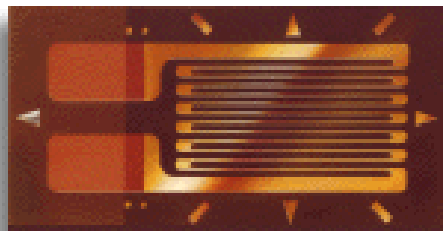


Figure 37: jauge de déformation

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho L}{s}$$

Où R est la résistance électrique

ρ La résistivité du matériau

L la longueur du fil

s la section du fil

En prenant le logarithme népérien et la différentielle de chaque membre et en considérant que les paramètres varient très peu lors de la mesure, on obtient la relation

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta s}{s}$$

Qui peut se réécrire

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

Où K est appelé le *facteur de jauge* (le plus proche de 2 pour le constantant).

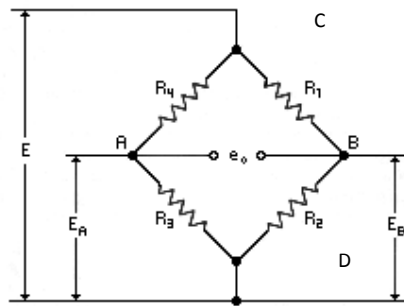
Les fabricants proposent des jauges de différentes tailles et de différentes formes en fonction des travaux d'analyse de contraintes. On aura donc des jauges simples pour l'analyse dans le sens de la déformation connue, des rosettes à 2 jauges (l'une pour le sens principal, l'autre pour la mesure du coefficient de Poisson ou encore pour la mesure de torsion), des rosettes à 3 jauges (45° ou 120°) lorsqu'on ignore les directions principales.

Des jauges de grandes dimensions (100 mm) sont également utilisées pour des mesures de déformations sur des matériaux hétérogènes, tel que le béton (les jauges à grande déformation).

III-4-2-3 Principe de mesure

La méthode la plus précise pour mesurer une variation de résistance consiste à placer la jauge dans un pont de Wheatstone (Figure 38). Lorsqu'un pont est constitué de 4 résistances de valeur égale et alimenté par une source de tension (E) constante aux points C et D, on obtient par symétrie, une différence de potentiel nulle entre les points A et B. Si la résistance R_1 varie légèrement, ce déséquilibre est mesuré par le galvanomètre (e_0).

On vérifiera facilement que R_1 et R_3 agissent dans le sens positif (augmentation de la résistance) tandis que R_2 et R_4 agissent dans le sens contraire.



$$\left(\frac{e_0}{E}\right)_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3}$$

Figure 38: Pont de Wheatstone.

Quand la différence de potentiel e_0 est nulle, le produit des résistances opposées est égal ($R_1R_3 = R_2R_4$).

Le montage peut être réalisé avec une seule jauge active (montage dit en quart de pont), deux jauges actives (demi-pont) ou encore quatre jauges actives (pont complet). Ce dernier montage est le montage le plus couramment utilisé pour les capteurs (force, pression...)

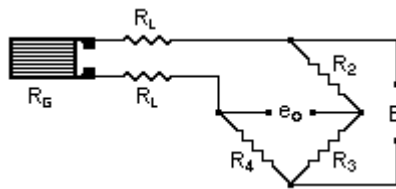


Figure 39 a: Montage en quart de pont

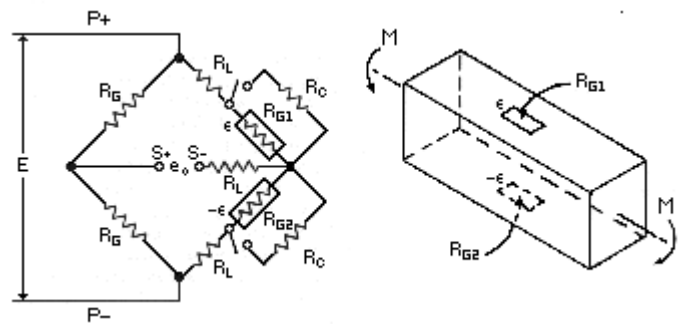


Figure 39 b: Montage en demi-pont

III-4-2-4 Câblage à 3 fils

Lors d'un montage en quart de pont, bien que la jauge soit auto compensée, il est par contre impossible de prévoir les effets thermiques sur les fils de liaison. C'est pourquoi, en raccordant la jauge en câblage 3 fils (figure 40) les effets parasites des deux branches adjacentes s'éliminent par symétrie.

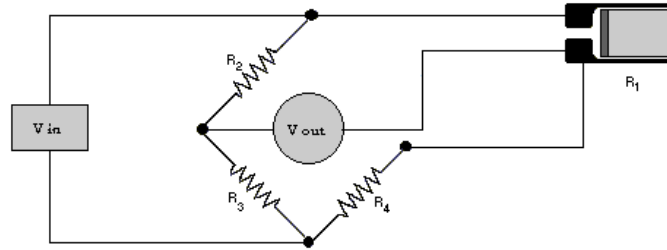


Figure 40: Câblage à 3 fils

III-4-2-5 Elongation maximale :

Toutes les jauges ont des limites d'allongement à ne pas dépasser sous peine de rompre la grille. Pour des jauges d'usage courant, les fabricants annoncent une élancement maximale de 3 à 5 %, selon la taille de la jauge. Attention: il faut aussi tenir compte du type de colle utilisée.

III-4-2-5 Réponse dynamique :

Du fait de leur faible inertie, les jauges sont capables de suivre des déformations dynamiques, même à très hautes fréquences. Toute fois comme les déformations sont des phénomènes qui se déroulent à la célérité de l'onde, une onde frontale plus petite ou égale à la dimension de la jauge ne donnera aucune indication. En règle générale, la jauge doit avoir une dimension de 1/10 de la longueur d'onde.

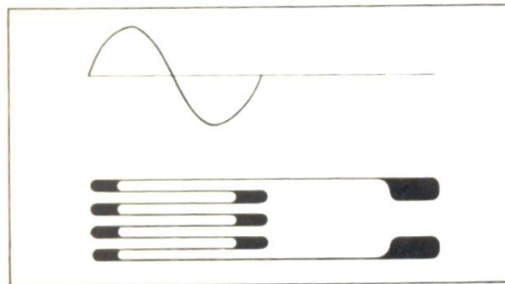


Figure 41: Longueur d'onde mécanique de l'ordre de grandeur de la jauge.

III-4-2-6 Collage des gauges :

Le collage des jauges se fait au niveau de laboratoire de la mécanique de solide (LMS). Pour coller les jauges il faut suivrent la manière suivante :

- Nettoyage de la tôle avec solvant (Dégrippant).
- Traçage de la tôle pour placer la jauge en position de sens de laminage.

-
- Nettoyage de la position de la jauge avec trichlorethylène (catalyseur) avec coton tige.
 - Avec une compresse en nettoyé la position avec du freon (neurtraliseur).
 - Poser la jauge à sa position sur le traçe et coller la avec une colle (super glue OHO).
 - Souder les fils avec fer à souder.

III-4-2-7 Instruments de mesure (Pont d'extensométrie P3500) :

Il s'agit d'un montage en pont de 4 résistances (dont 3 sont connues et la 4ème correspond à la résistance de la jauge de contrainte que l'on veut mesurer).

Lorsque les 4 résistances sont égales, le pont est équilibré, et la mesure de tension indique 0V.

Lorsque l'on applique un effort sur le capteur, la 4ème résistance évolue, et le pont se déséquilibre. La tension mesurée est en relation directe avec l'effort appliqué sur le capteur



Figure 42: Pont d'extensomètre P3500

III-4-2-8 Réglage du pont :

- Réaliser le raccordement de la jauge au pont d'extensométrie.
- Positionner le bouton « $\frac{1}{4}$ de pont - $\frac{1}{2}$ pont - pont entier » sur le pont.
- Régler le zéro ampèremètre.
- Calculer et régler le facteur de jauge (facteur reliant la valeur du poids à la valeur affichée en fonction du type de capteur)
- Enfoncer le bouton « mesure »

-
- Régler l'équilibre du pont à l'aide des boutons de réglage de l'équilibre (cela permet d'afficher zéro 0 lorsque la jauge est positionnée verticalement et qu'il mesure son propre poids)
 - Vérifier l'étalonnage du pont en mesurant des poids connus

III-5 Manipulation du l'essai:

Pour réaliser ces essais il faut passer par Les différentes étapes suivantes:

- Mise en place du dispositif (module d'emboutissage) sur la machine (HOYTON-S-L).
- Fixation de l'éprouvette entre la matrice et le serre flan, tout en tenant compte du centrage de l'éprouvette.
- Réglage de la machine et la vitesse de l'opération d'emboutissage (On a choisi une vitesse de 0.35mm/min).
- Réglage du pont d'extensomètre pour les mesures de déformations.
- Lancer l'opération jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les résultats de l'essai d'emboutissage:

Les courbes suivants présentent l'évolution de la charge avec le déplacement du poinçon pour les trois épaisseurs (Annex2).

- Tôle d'épaisseur 0.5 mm :

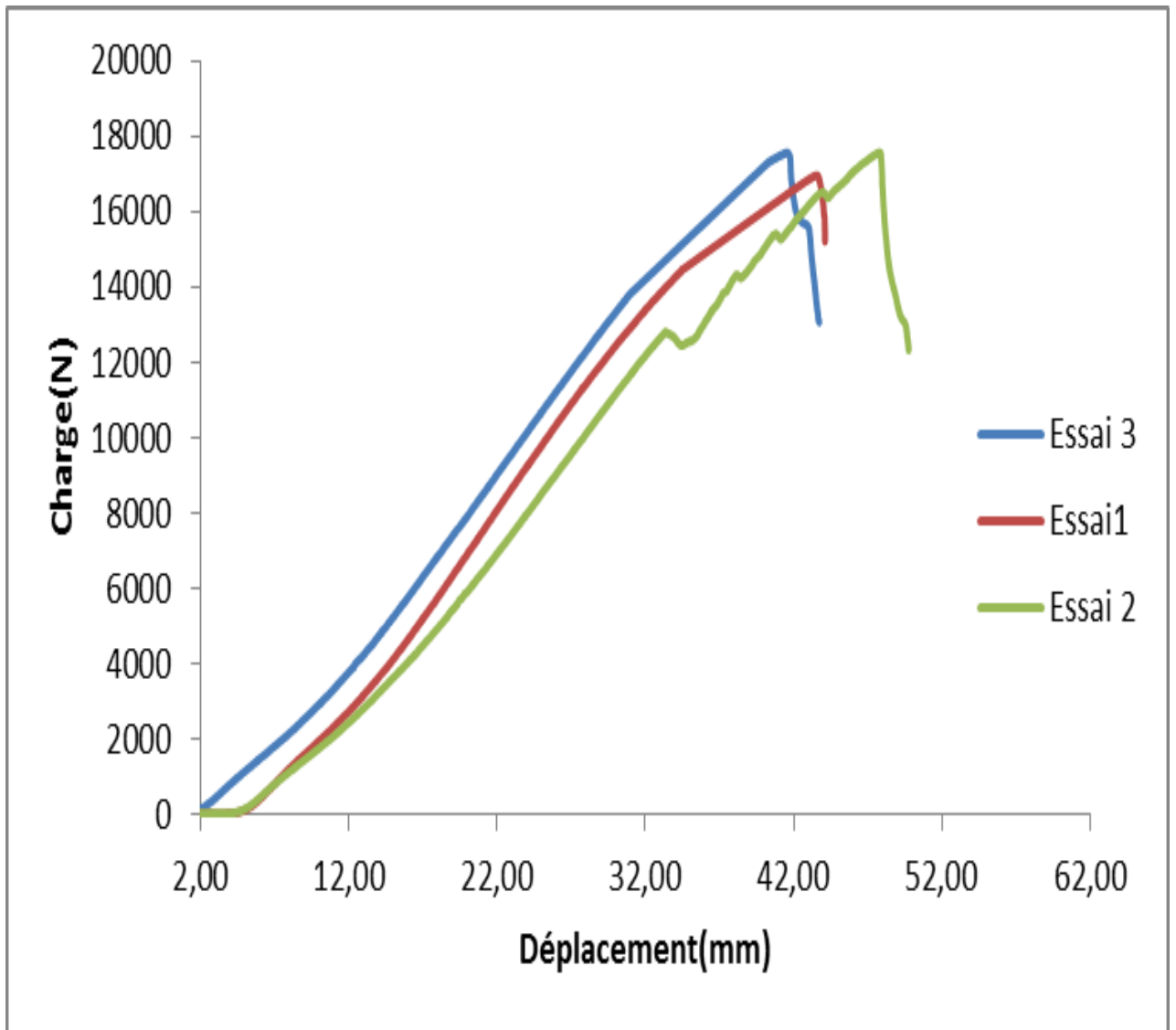


Figure 43 : Évolution de la force du poinçon en fonction de Déplacement cas tôle d'épaisseur 0.5 mm.

Les courbes ci-dessus montrent la relation entre la charge appliquée sur la tôle et le déplacement du poinçon, on voit que la charge augmente si le déplacement du poinçon augmente dans tous les essais, sauf dans l'essai 2 il y a des Pics dû au phénomène de glissement du flan entre la matrice et le serre flan.

- Tôle d'épaisseur 0.7 mm :

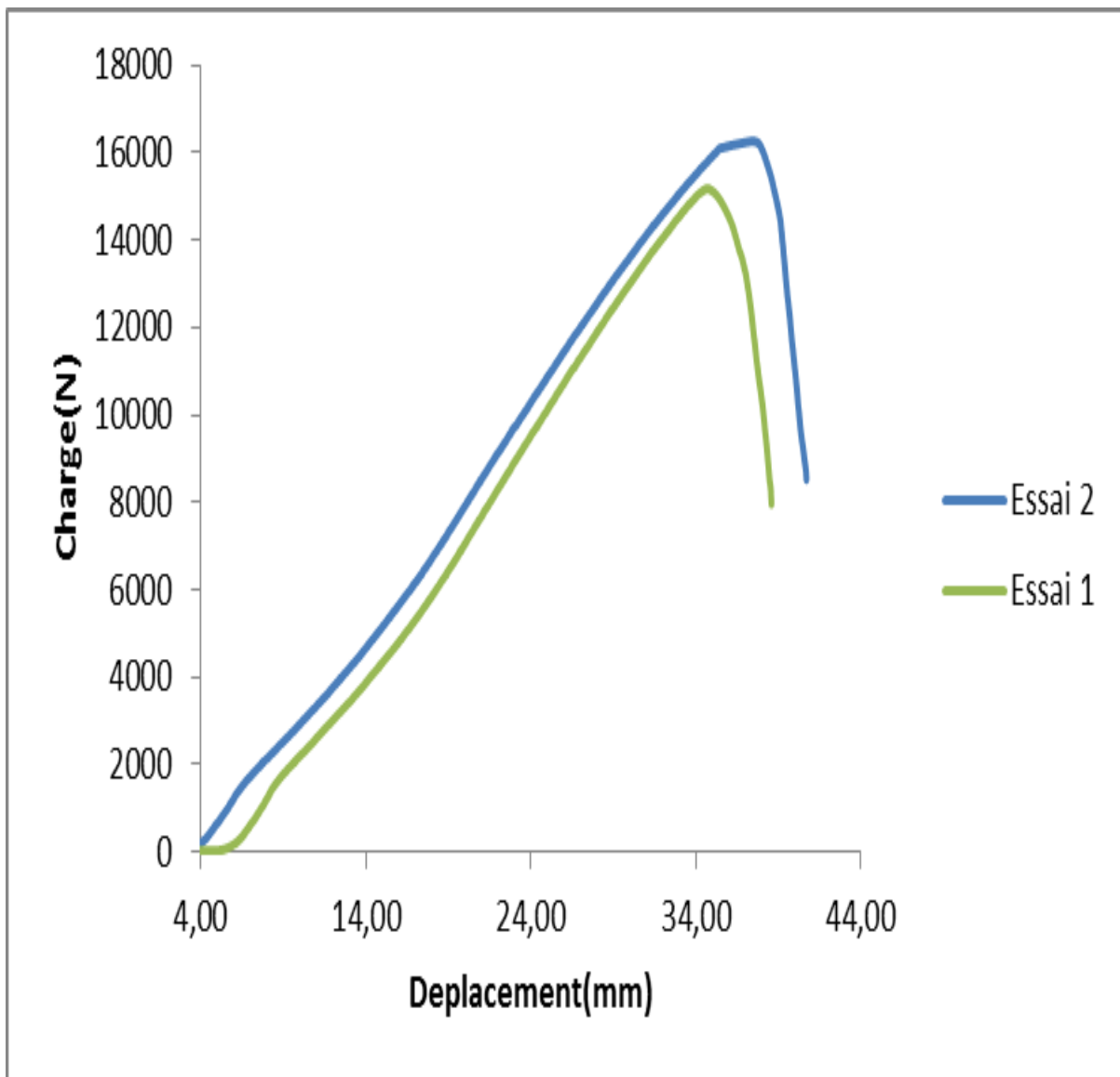


Figure 44: Évolution de la charge du poinçon en fonction du Déplacement cas de la tôle d'épaisseur 0.7mm.

Nous trouvons que la charge du poinçon varie en fonction du déplacement dans le procédé de mise en forme d'emboutissage. Au début elle augmente jusqu'à une valeur maximale, et diminue ensuite à la rupture.

- Tôle d'épaisseur 1 mm :

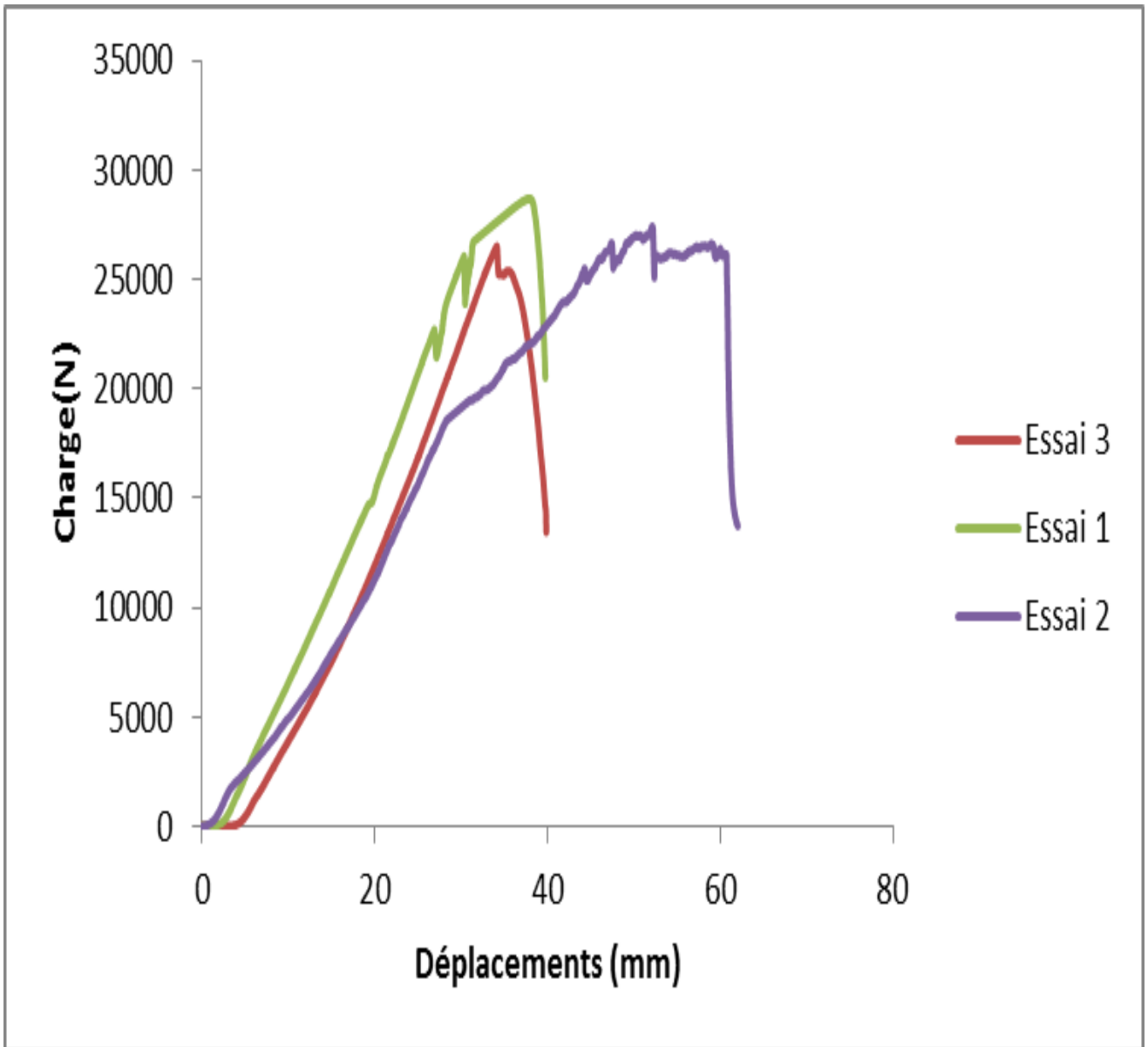


Figure 45 : Évolution de la charge du poinçon en fonction du Déplacement pour la tôle d'épaisseur 1 mm.

Nous trouvons évidemment que la charge du poinçon varie en fonction du déplacement dans le procédé d'emboutissage. Au début elle s'élève au fur et à mesure jusqu'à une valeur maximale, et diminue ensuite.

Mesure de l'amincissement :

Il est évident que l'épaisseur du flan est soumise à des variations sensibles suivant la zone considérée sur l'embouti, et par suite sa surface finale n'est pas exactement identique à la surface du flan.

L'amincissement de l'épaisseur de la tôle pendant l'opération d'emboutissage s'exprime par un coefficient d'amincissement :

$$\alpha = e_m/e$$

α : Coefficient d'amincissement.

e_m : moyenne arithmétique des épaisseurs d'embouti (mm).

e : épaisseur du flan (mm).

Les différents points de mesure de l'amincissement choisis :

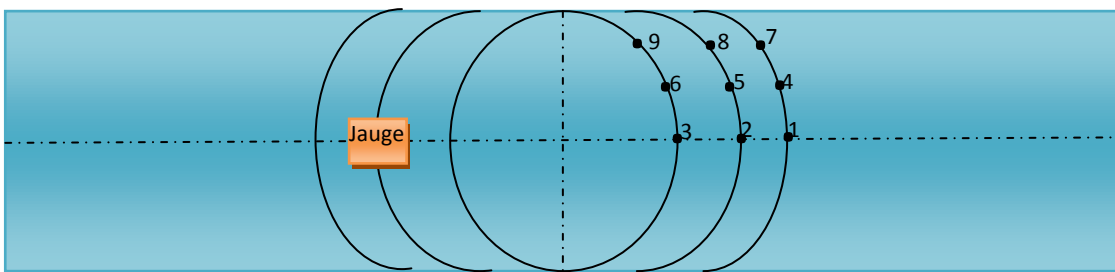


Figure 46: Différents points de mesure de l'amincissement.

Les graphes qui suivent montrent l'évolution du coefficient d'amincissement α par rapport aux points de mesure, avec les points 1,4 et 7 situés dans la ligne du côté du serre flan, les points 2,5 et 8 sur la ligne du milieu de surface entre serre-flan et poinçon. Les points 3,6 et 9 à la ligne du côté de poinçon.

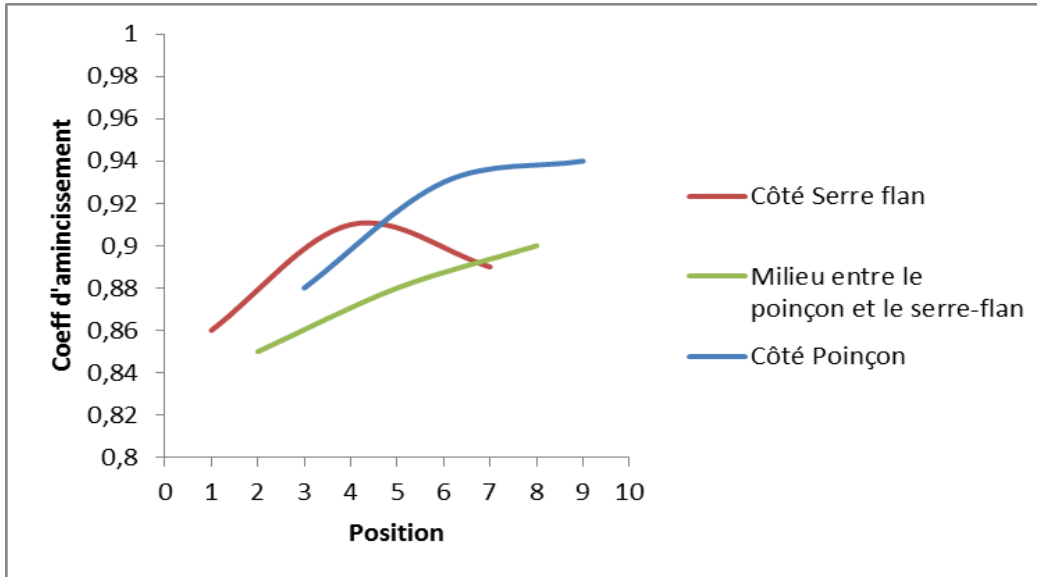


Figure 47: Evolution du coefficient d'amincissement en différents points de l'embouti (tôle d'épaisseur 0.5 mm)

les courbes montrant l'évolution du coefficient d'amincissement en différents points de mesure, on voit que les points situés dans le milieu de la zone de déformation (points, 2, 5, 8) sont les points où la tôle est la plus amincie par rapport aux autres points, car elle subit la déformation la plus importante.

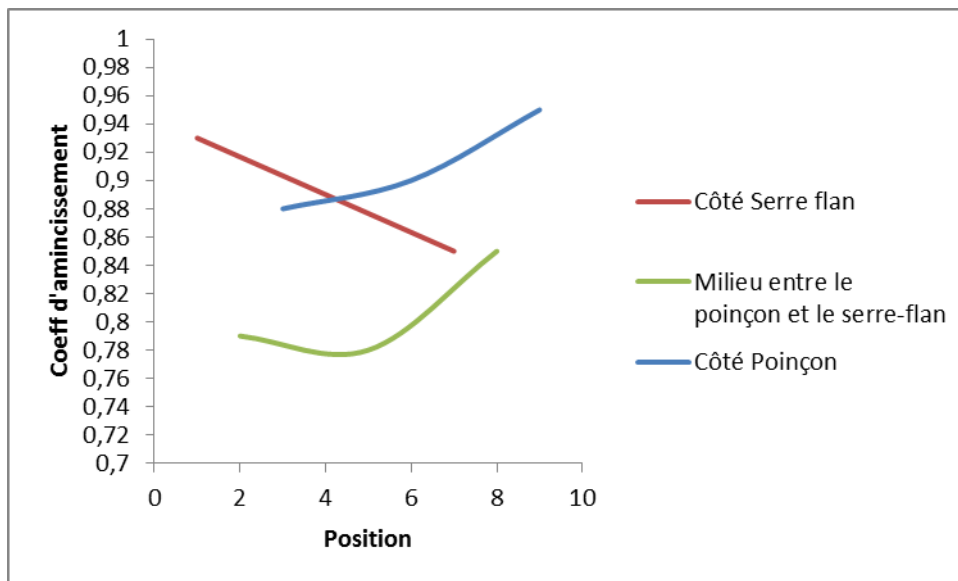


Figure 48: Evolution du coefficient d'amincissement en différents points de l'embouti (tôle d'épaisseur 0.7 mm)

Pour la tôle d'épaisseur de 0.7 mm les courbes montrant l'évolution du coefficient d'amincissement en différents points de mesure, on remarque que les points (2,5 et 8) situés dans

le milieu de la zone de déformation sont les points les plus amincis par rapport aux autres situés à côté de serre-flan et à coté de poinçon, à cause les déformations importantes.

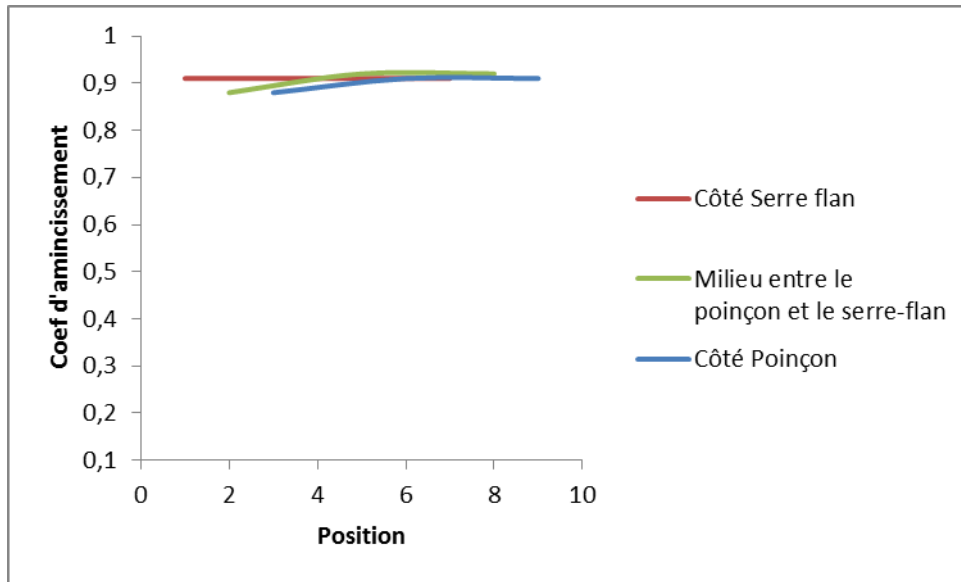


Figure 49: Evolution de coefficient d'amincissement en différents points de l'embouti (tôle d'épaisseur 1mm)

Dans les courbes montrant l'évolution du coefficient d'amincissement pour les points de mesure de la tôle d'épaisseur 1 mm, on voit que les courbes sur les trois côtés sont semblables (la forme des courbes est linéaire), car la distribution uniforme des déformations sur tous les points de mesures.

Les dimensions de la tôle après déformation :

Les longueurs L1, L2 et L3 sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse dans les trois positions comme indiqué dans la figure ci-dessous (figure 50), avec h la profondeur de la tôle déformée.

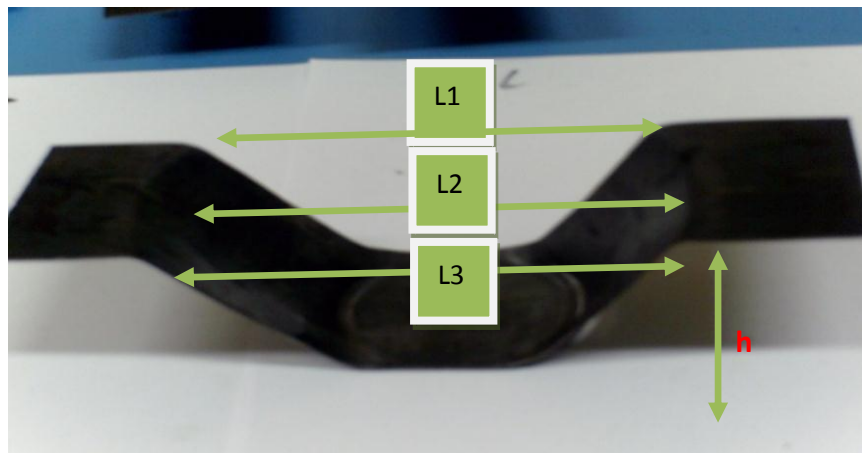


Figure 50: les longueurs L1, L2, L3 et h la profondeur de la tôle déformée.

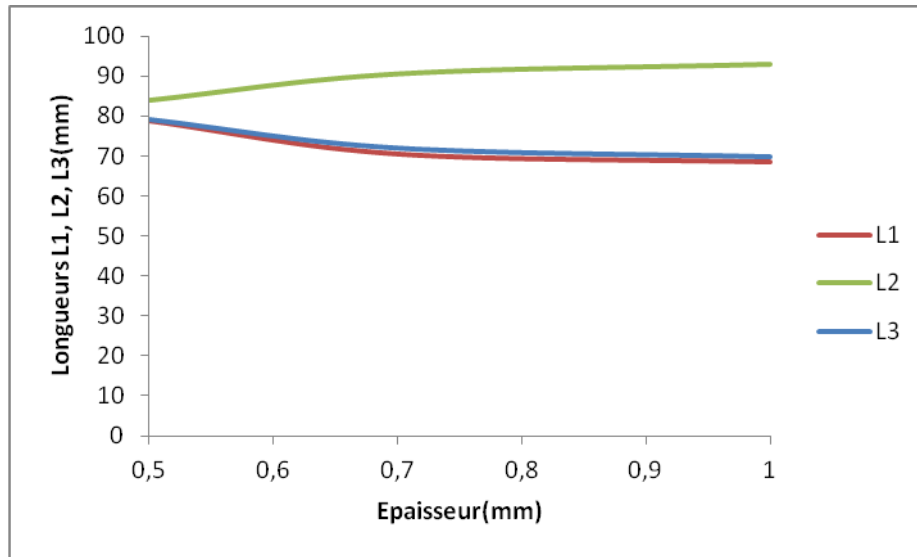


Figure 51: Evolution des différentes longueurs de l'embouti en fonction des différentes épaisseurs.

Pour les courbes longueur (L1, L2, L3) pour les 3 épaisseurs, on peut dire que les longueurs L1 et L3 auraient une décroissance c'est à dire qu'ils diminuent lorsque l'épaisseur augmente, et la contraire pour L2 augmente avec la croissance de l'épaisseur.

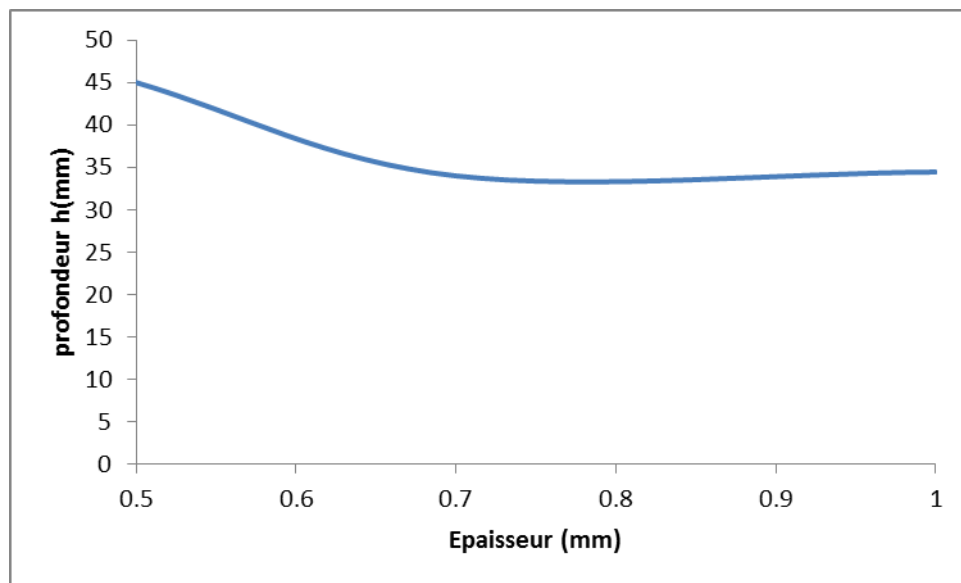


Figure 52: Evolution des profondeurs de l'embouti en fonction des différentes épaisseurs

La courbe profondeur h en fonction de l'épaisseur, montre que la profondeur diminue lorsque l'épaisseur augmente.

Mesure de la diminution de la largeur de l'embouti:

Les distances S_1 , S_2 et S_3 sont les largeurs mesurées entre les côtes de la tôle testée comme indiqué ci-dessous dans (la figure 53).

H_{11} H_{33} sont des profondeurs de convection dans différents points.

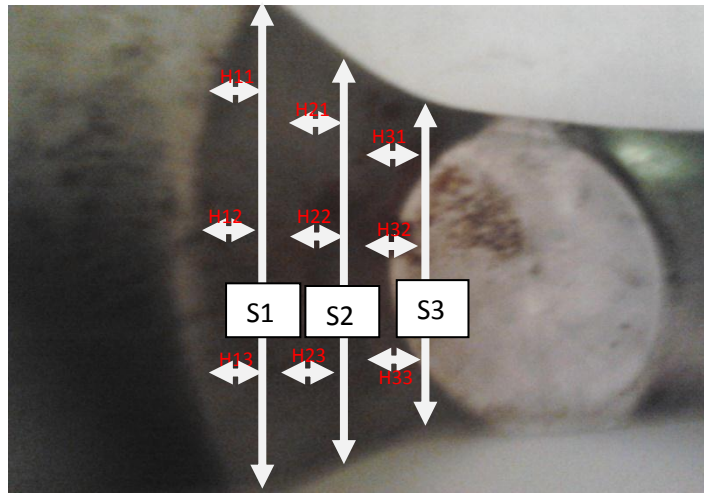


Figure 53: les longueurs S_1 , S_2 , S_3 et H_{ij} de la tôle déformée.

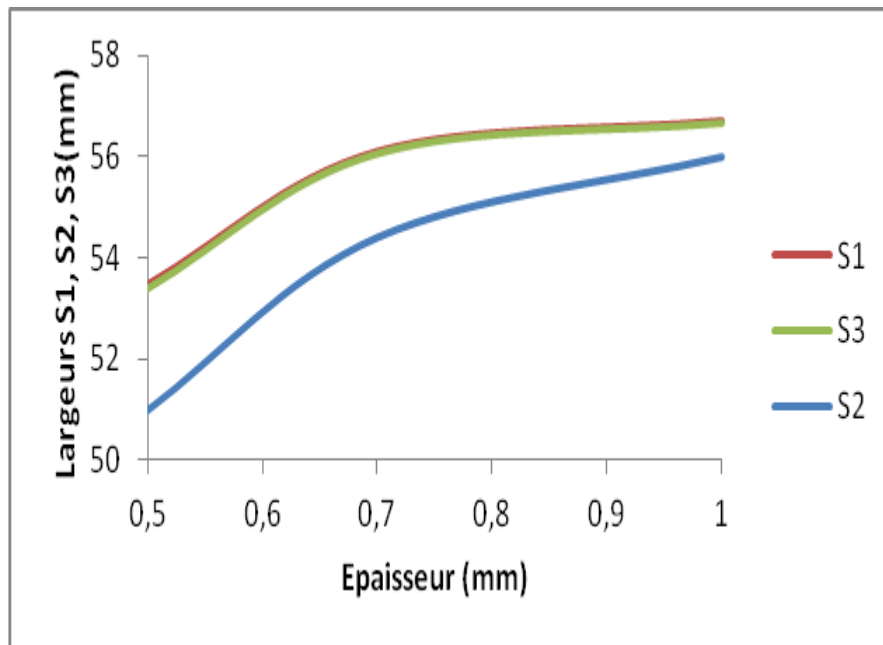


Figure 54: Evolution des différentes largeurs du flan en fonction des différentes épaisseurs.

Pour les courbes des largeurs S1, S2, S3 pour les différentes épaisseurs, on voit que les largeurs augmentent si l'épaisseur augmente. Aussi la largeur S2 est petite par rapport à S1 et S3 en effet la concentration de la déformation est au milieu de la zone de déformation.

Calcul de la convection H de la tôle embouti pour les trois largeurs :

❖ Pour la ligne du côté de serre flan S1 :

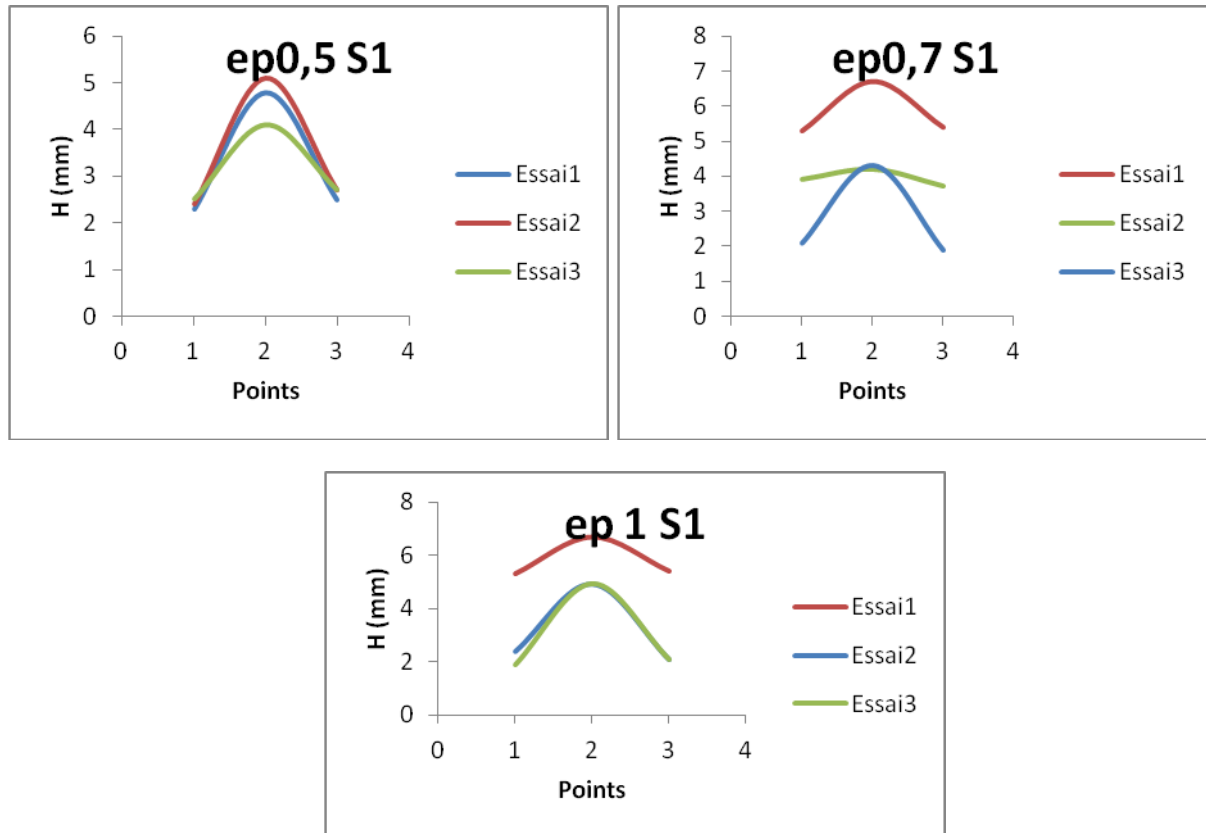


Figure 55 : Courbes de convection pour la ligne du côté du serre flan S1

Les courbes ci-dessous représentent l'évolution de déformation de la partie entre le poinçon et le serre flan (brin) pour la ligne du coté du serre flan. On voit bien que la déformation et de même forme avec une légère différence pour les trois épaisseurs.

❖ Pour la ligne du milieu S2 :

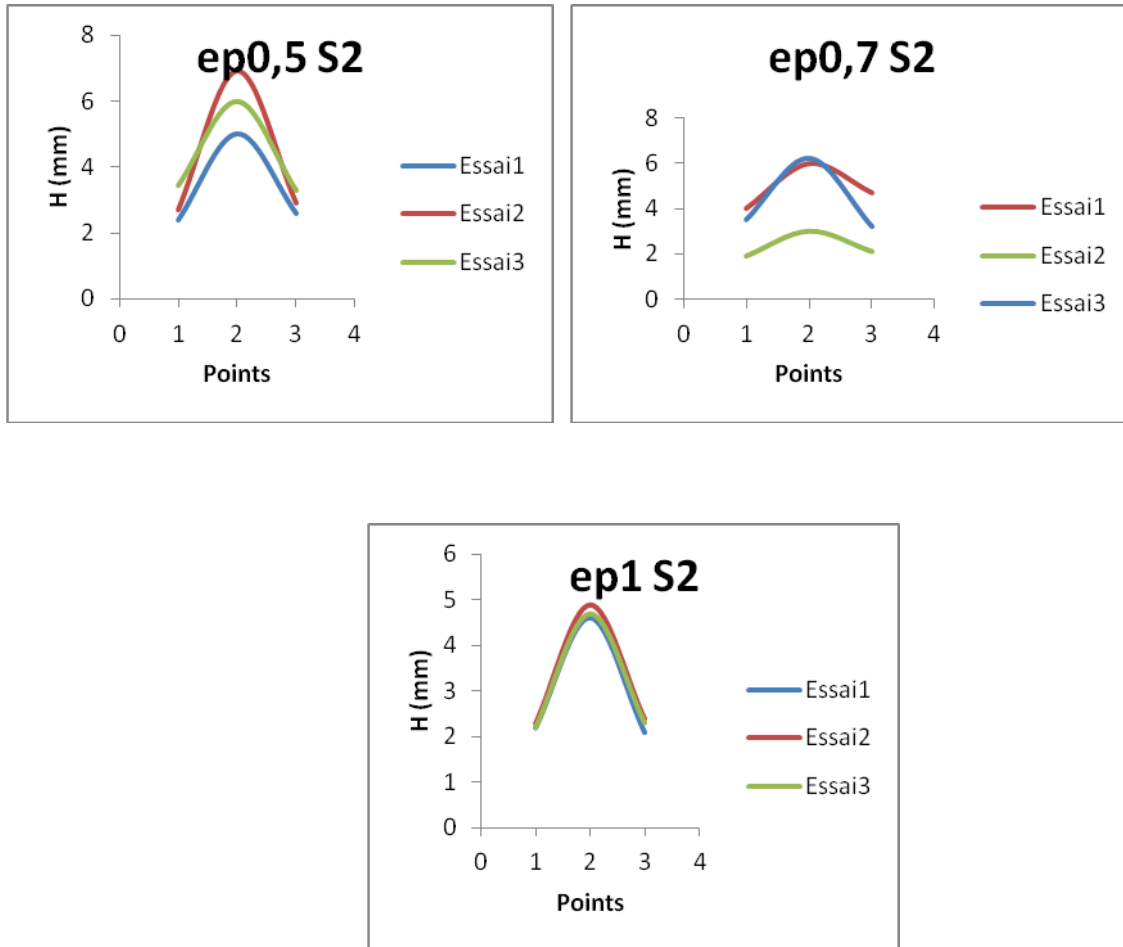


Figure 56 : Courbes de convection pour la ligne de milieu S2

Les trois courbes ci-dessous représentent l'évolution de la déformation de la partie entre le poinçon et le serre flan (brin) dans la ligne du milieu. On voit que la déformation a la même forme sur les tôles d'épaisseur de 0.5 et 1 mm avec légère différence pour la tôle d'épaisseur 0.7mm.

❖ Pour la ligne du côté du poinçon S3 :

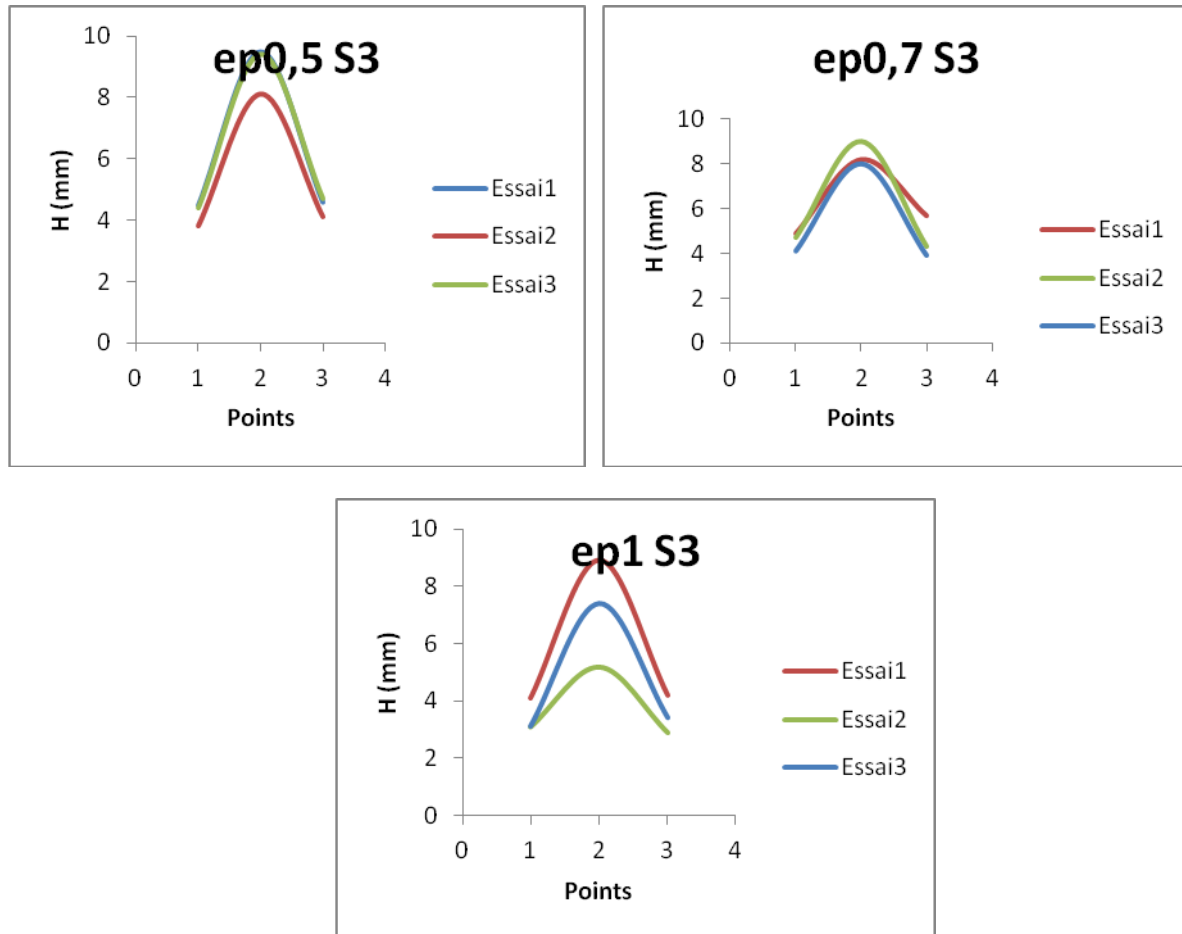


Figure 57 : Courbes de convection pour la ligne côté de poinçon S3

Les trois courbes ci-dessous représentent l'évolution de la déformation de la partie entre le poinçon et le serre flan (brin) le long de la ligne du poinçon. ces courbes montrent que la déformation a la même forme sur les trois tôles, avec une légère différence pour la tôle d'épaisseur 1 mm.

❖ La mode de déformation du côté de la tôle emboutie:

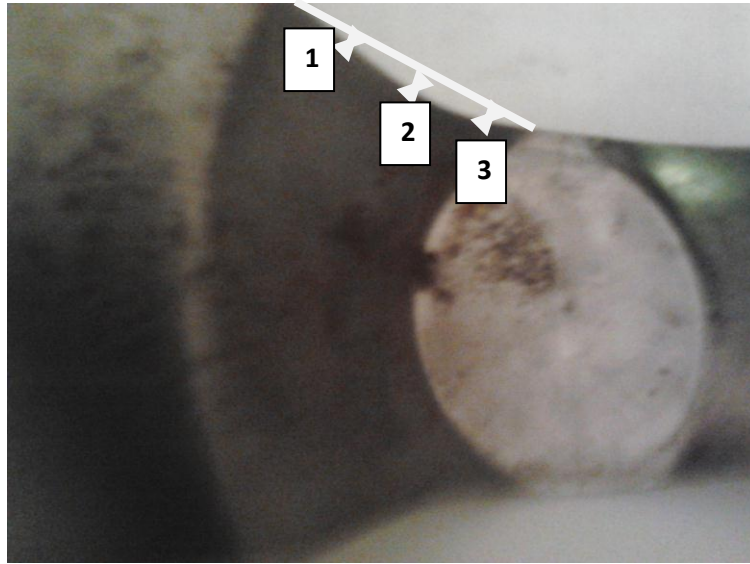


Figure 58 : la déformation sur le côté de la tôle.

Les courbes suivantes présentent la mode de déformation du côté de la tôle emboutie, sachant que les points 1, 2, et 3 sont situés le long de la ligne du serre flan, au milieu et le long de la ligne de poinçon. A partir de ces courbes on a essayé de discrétiser leur courbure par une même équation pour les trois épaisseurs, l'équation est de forme sinusoidale :

$$y = A \sin \frac{\pi}{2} (x - 1) + B$$

- Pour la tôle d'épaisseur de 0.5mm :

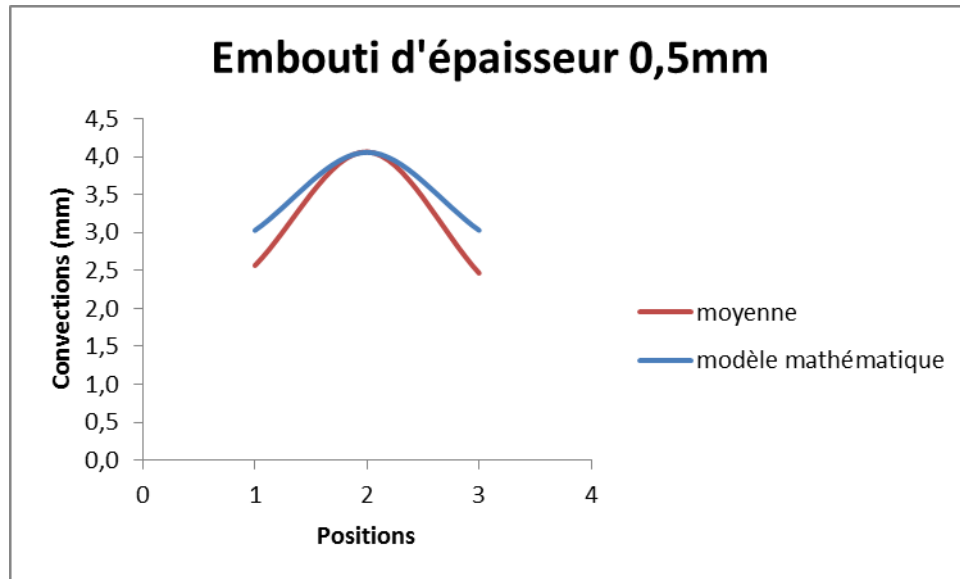


Figure 59 : Courbes montrant le mode de déformation sur le côté de la tôle d'épaisseur 0.5 mm

On voit bien que dans la figure 59 la moyenne des déformations sur le côté de la tôle d'épaisseur 0.5 mm pour les trois essais ont même courbure, si on discrétise les courbes on trouve qu'ils sont de forme sinusoïdale (forme moyenne pour les trois essais) :

$$y = 1.03 \sin \frac{\pi}{2} (x - 1) + 3.03$$

Et on remarque que le modèle mathématique a presque la même forme avec la moyenne des trois courbes

- Pour la tôle d'épaisseur de 0.7 mm :

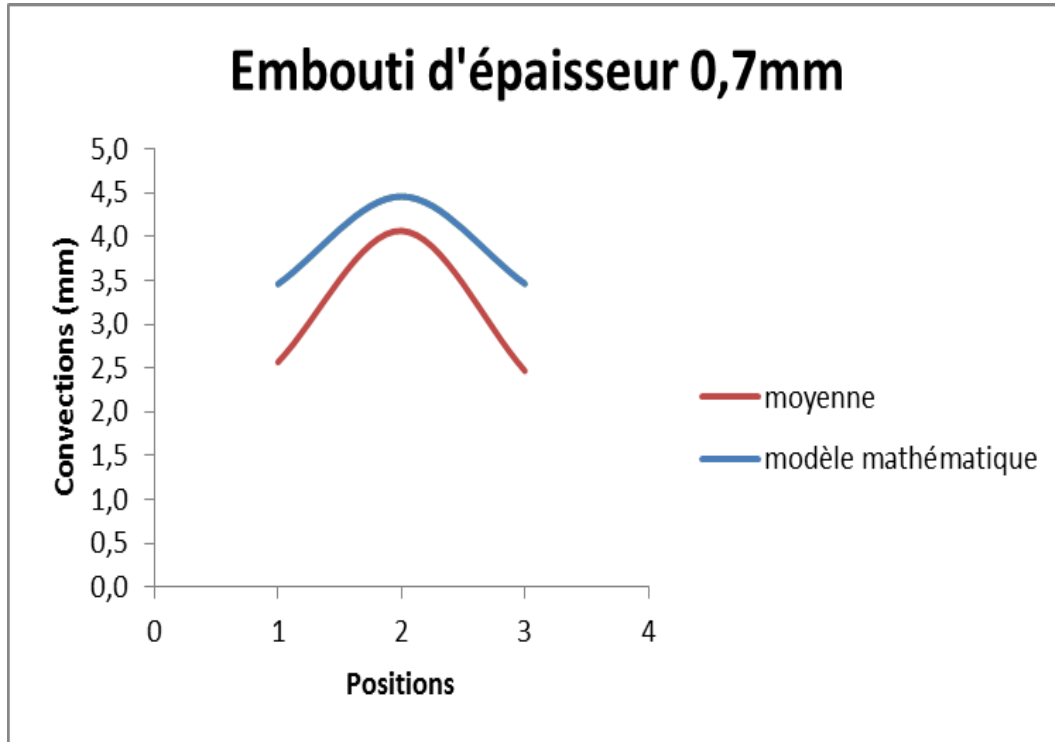


Figure 60 : Courbes montrant le mode de déformation sur le côté de la tôle d'épaisseur 0.7mm

On voit bien que la figure 60 représente la moyenne des déformations sur le côté de la tôle d'épaisseur 0.7 mm pour les trois essais qui ont la même courbure, si on discrétise les courbes on trouve qu'ils sont de forme sinusoïdale (forme moyenne pour les trois essais) :

$$y = 1 \sin \frac{\pi}{2} (x - 1) + 3.46$$

Et on remarque le modèle mathématique et légèrement différent avec la moyenne des trois essais.

- Pour la tôle d'épaisseur 1 mm :

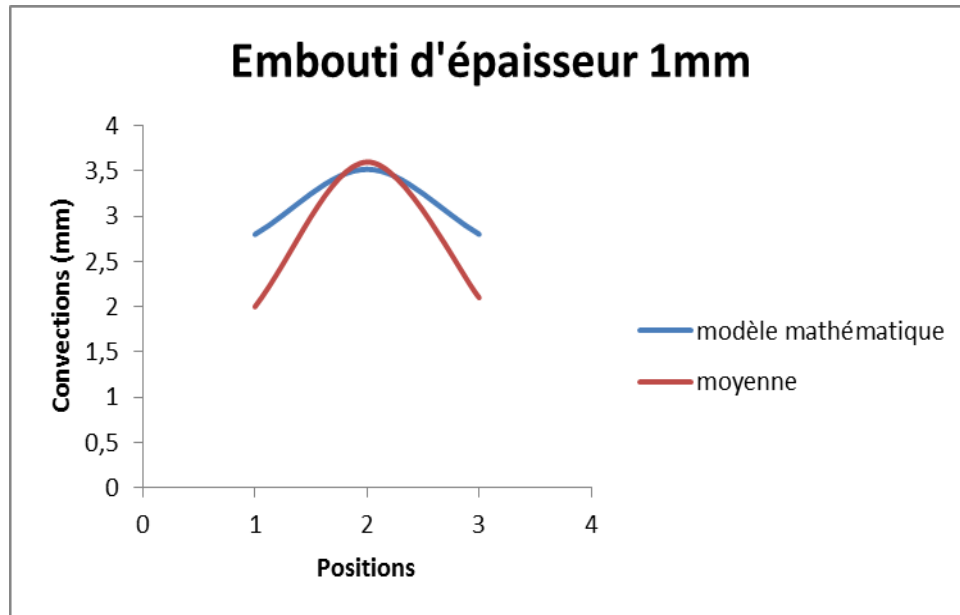


Figure 61 : Courbes montrant le mode de déformation sur le côté de la tôle d'épaisseur 1 mm

La figure 61 représente la moyenne des déformations sur le côté de la tôle d'épaisseur 0.7 mm pour les deux essais qui ont la même courbure, si on discrétise les courbes on trouve qu'ils sont de forme sinusoïdale (forme moyenne pour les trois essais) :

$$y = 0.72 \sin \frac{\pi}{2} (x - 1) + 2.8$$

Après le traçage du modèle mathématique on voit qu'il y a une légère différence entre la courbe moyenne trouvée expérimentalement et le modèle mathématique.

- Les courbes de déformation pour les tôles d'épaisseurs 0.5, 0.7 et 1 mm :

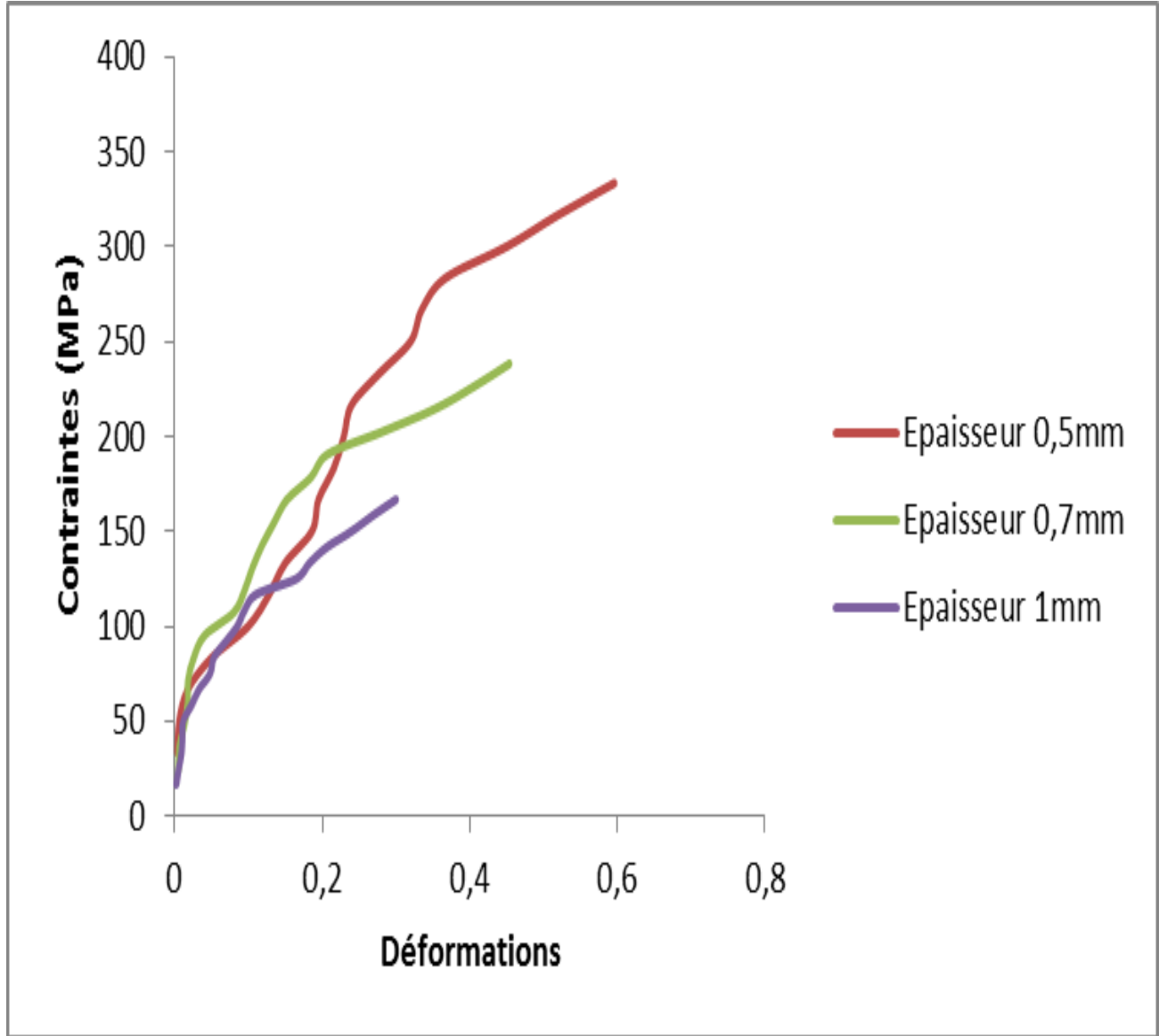


Figure 62: les courbes de contraintes en fonction des déformations pour les tôles d'épaisseurs 0.5, 0.7 et 1 mm.

Les courbes ont été obtenues à l'aide des mesures par jauges de déformations collées au milieu de la partie entre poinçon et le serre flan (figure 62), on voit bien que les trois tôles ont même déformation pour les petites charges tandis que pour la tôle d'épaisseur 0.5mm est plus grande que les autres lorsque la charge augmente jusqu'à la rupture de la jauge, et aussi les courbes montrent que la déformation augmente avec l'augmentation de la charge et la diminution de l'épaisseur du tôle.

Localisation de la rupture dans les tôles déformées :

Les figures ci-dessous montrent que les ruptures des tôles pour les trois épaisseurs sont comme des déchirures au niveau la zone qui est plus proche du serre flan comme dans les figures (63a, 63b, 63c), sauf l'essai 2 de la tôle d'épaisseur 1 mm la rupture se fait au niveau de la zone de poinçon.



(a)

(b)



(c)

Figure 63: Types de rupture Pour les tôles d'épaisseurs 0.5mm (a), 0.7mm (b), et 1mm (c)

CHAPITRE IV

IV-1 Introduction sur le code ABAQUS :

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non linéaires.

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

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

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

IV-2 Présentation du logiciel ABAQUS :

Les Modules :

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

- **Le module « PART ».**

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

- **Le module « PROPERTY ».**

Le module Propreté permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

- **Le module « ASSEMBLY ».**

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

- **Le module « STEP ».**

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

- **Le module « INTERACTION ».**

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

- **Le module « LOAD ».**

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des pas, par exemple une force est appliquée au pas 1 mais inactive au pas 2.

- **Le module « MESH ».**

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. Dans ABAQUS il existe un nombre important de types de mailles possibles :

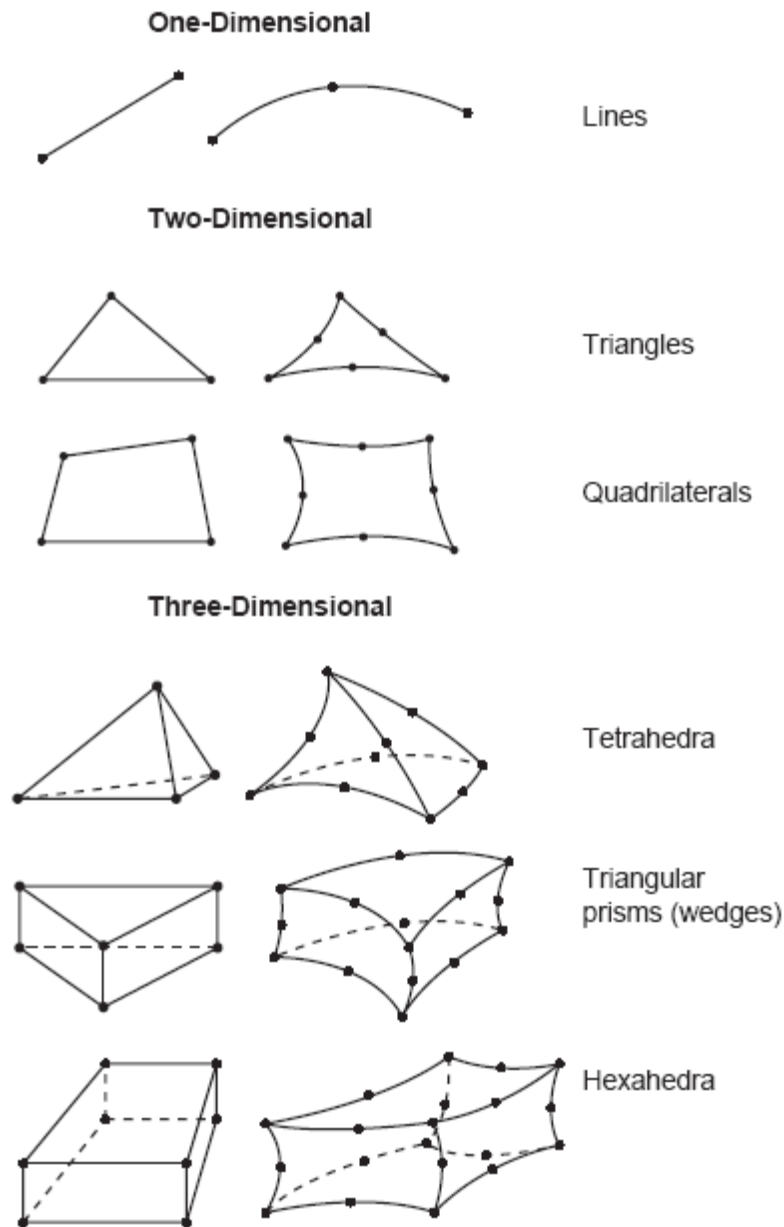


Figure 64 : Types des éléments de maillage dans l'ABAQUS.

Dans notre cas on a utilisé élément de maillage Quadratique à 4-noeud pour coque mince ou épais

- **Le module « JOB ».**

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

- **Le module « VISUALIZATION ».**

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

- **Le module « SKETCH ».**

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

IV-3 La démarche de simulation avec ABAQUS :

Nous allons tout d'abord commencer avec un petit tutorial simple afin de se familiariser avec le logiciel.

Les démarches de cette simulation :

- Création d'un objet (Module d'emboutissage et flan)
- Définir le matériau
- Définir et affecter les propriétés de section
- Assembler le modèle
- Définir des pas d'analyse
- Appliquer des conditions limites et des chargements sur le modèle
- Mailler le modèle (Quadratique à 4-noeuds pour coque mince ou épais)
- Créer et soumettre un travail d'analyse
- Visualiser les résultats

IV-4 Les résultats obtenus par la simulation :

Les résultats qui suivent sont pour l'opération de l'emboutissage sur les tôles de différentes épaisseurs 0.5, 0.7 et 1mm :

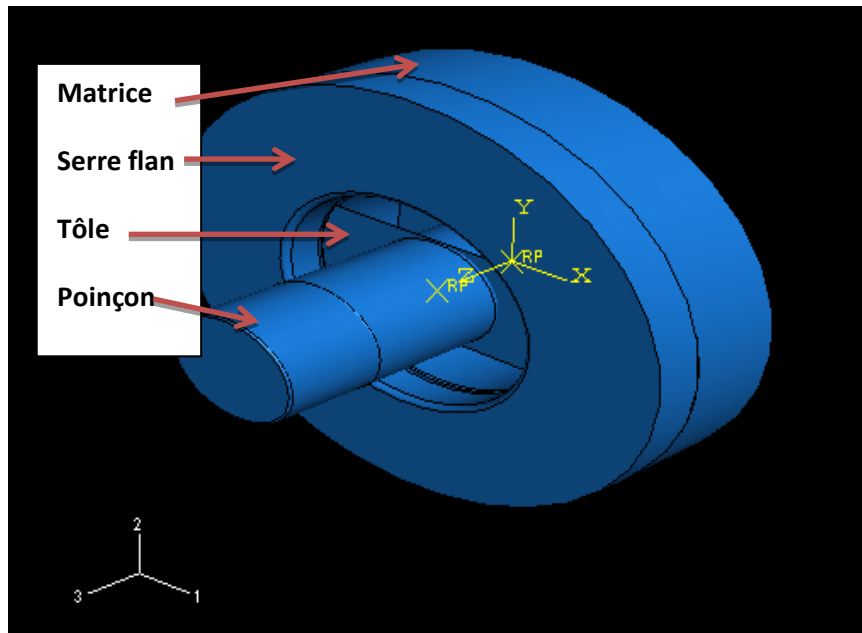


Figure 65 : Tôle à emboutir avec poinçon en ABAQUS avant mise en forme.

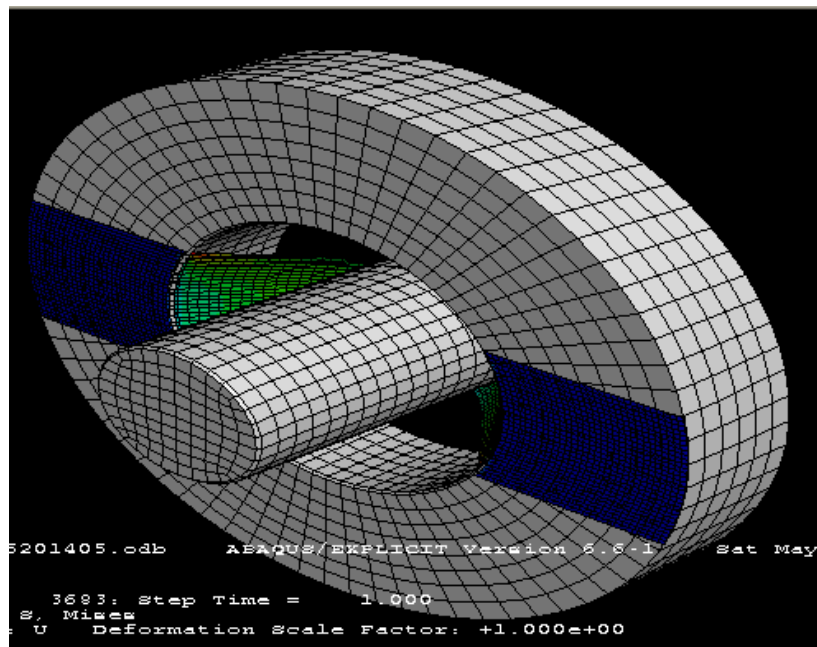


Figure 66 : Tôle embouti avec poinçon en ABAQUS (après la mise en forme)

Les figures ci-dessus (65 et 66) présentent l'ensemble de l'opération d'emboutissage serre flan, tôle et poinçon avant et après la mise en forme réaliser sur le code ABAQUS.

1) Simulation de la tôle d'épaisseur 0.5 mm :

Pour la simulation de l'opération d'emboutissage sur tôle d'épaisseur de 0.5 mm, on a posé les conditions suivantes : Tôle de 240 mm x 60 mm et d'épaisseur 0.5 mm, module d'Young $E = 2.2 \cdot 10^5$ MPa, coefficient de Poisson 0.3.

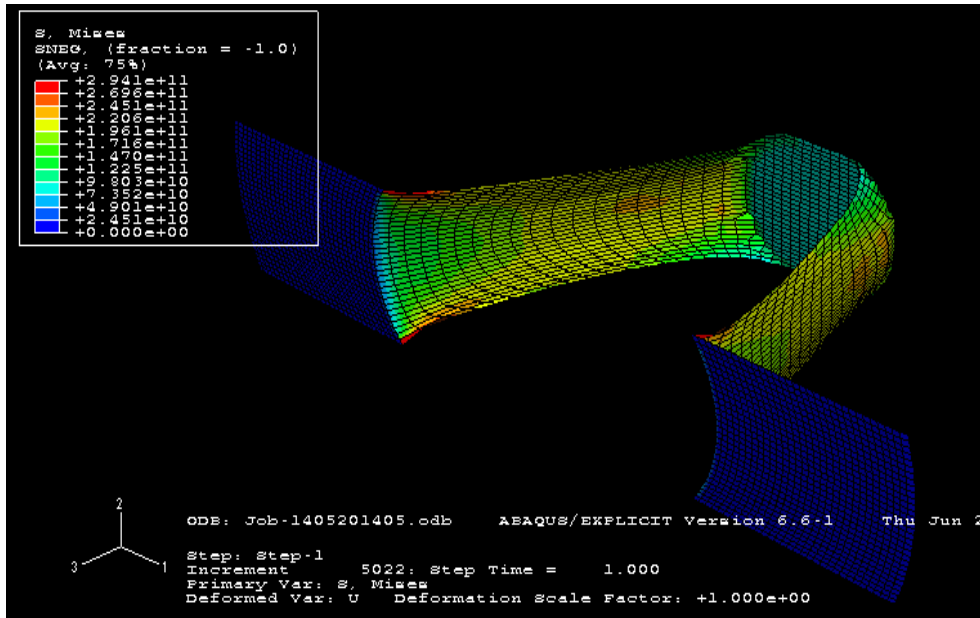


Figure 67: Distribution des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.5 mm.

La figure ci-dessus présente la distribution des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.5mm ; on voit bien que les grandes contraintes sont concentrées au niveau des côtés de l'emboutie proche du serre flan, puis à côté du poinçon. Tandis qu'au milieu de la surface libre on a des contraintes moyennes.

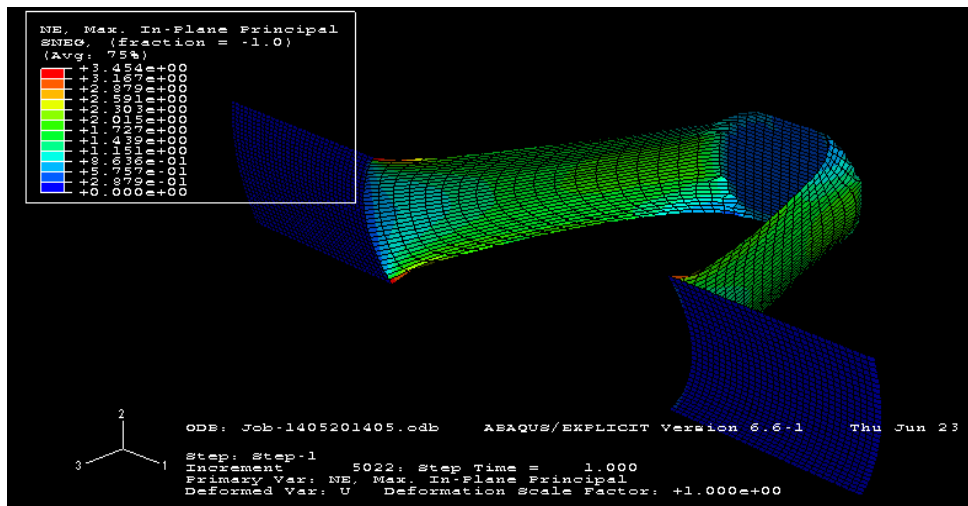


Figure 68: Distribution des déformations pour la tôle emboutie d'épaisseur 0.5 mm

La figure ci-dessus présente la distribution des déformations sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.5 mm, on remarque que les grandes déformations sont situées au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, puis à côté du poinçon, et aussi au milieu de la surface libre.

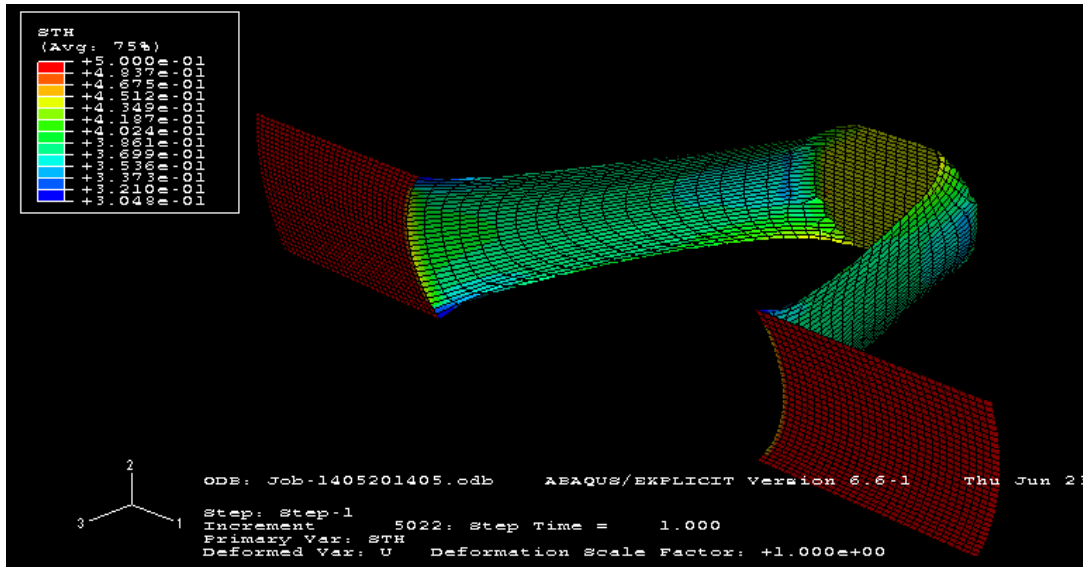


Figure 69: Amincissement dans tôle embouti d'épaisseur 0.5 mm

La figure ci-dessus représente la distribution de l'amincissement dans la tôle emboutie d'épaisseur 0.5mm, on voit bien que l'amincissement est concentré au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, et près du milieu de la surface libre.

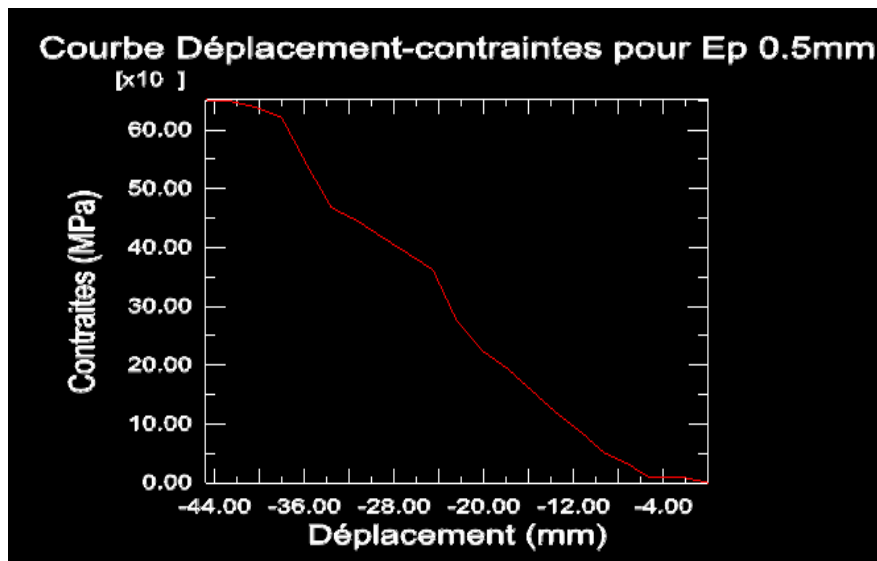


Figure 70: Courbe contrainte en fonction du déplacement pour l'embouti d'épaisseur 0.5 mm.

La figure ci-dessus représente l'évolution des contraintes en fonction du déplacement pour la tôle emboutie d'épaisseur 0.5mm, on voit bien que les contraintes augmentent avec l'augmentation du déplacement du poinçon.

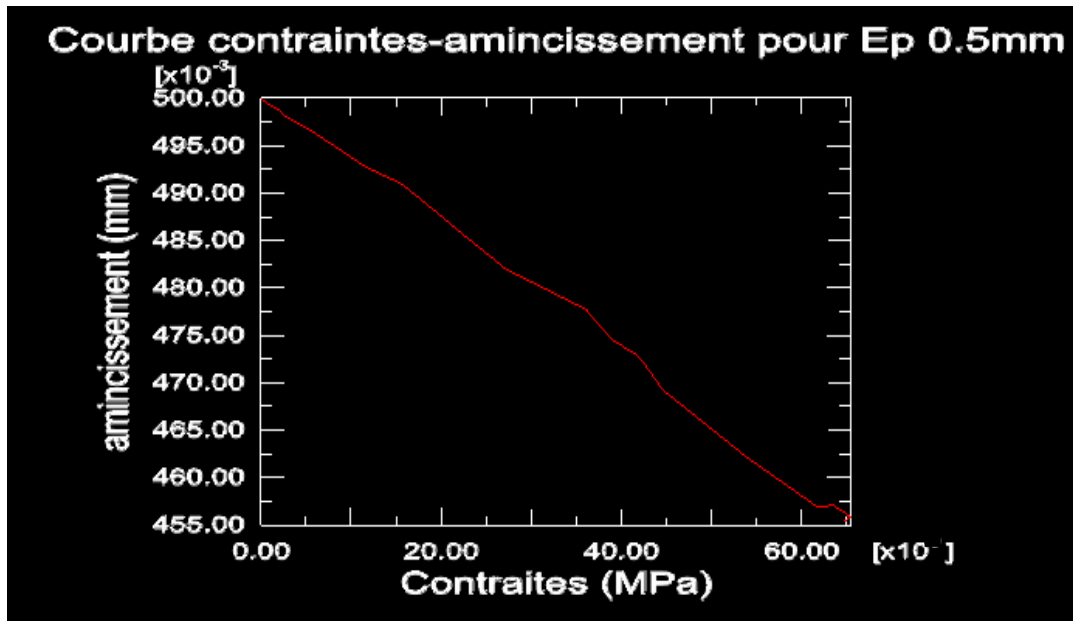


Figure 71: Courbe contrainte- amincissement pour l'embouti d'épaisseur 0.5mm.

La figure ci-dessus représente l'évolution de l'amincissement en fonction des contraintes sur la tôle d'épaisseur 0.5mm, on note que l'épaisseur de la tôle diminue avec l'augmentation des contraintes.

2) Simulation de la tôle d'épaisseur 0.7mm :

Pour la simulation de l'opération d'emboutissage sur tôle d'épaisseur 0.7 mm, on a posé les conditions suivantes : Tôle du 240 mm x 60 mm et d'épaisseur 0.7 mm, module d'Young $E = 2.2 \times 10^5$ MPa, coefficient de Poisson 0.3.

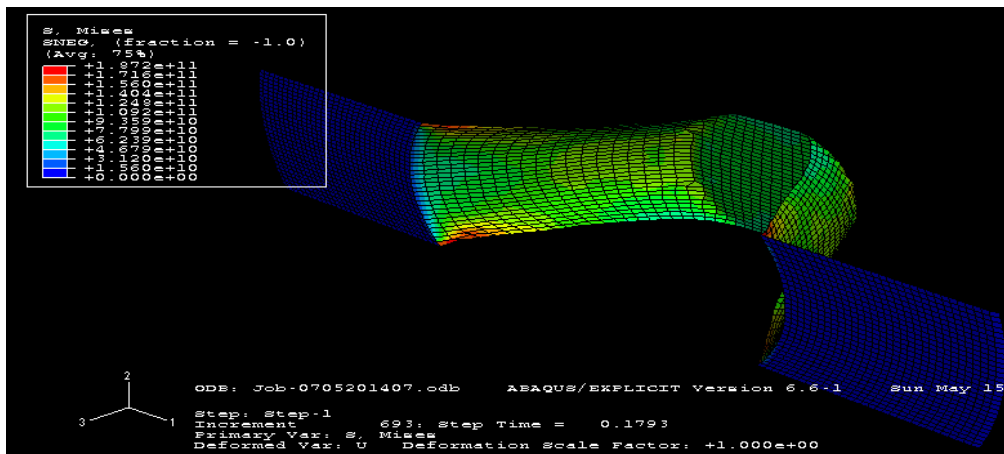


Figure 72: Distribution des contraintes dans tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm

La figure ci-dessus représente la distribution des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm, on voit bien que les contraintes sont plus grandes au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, puis à côté du poinçon et au milieu de la surface libre.

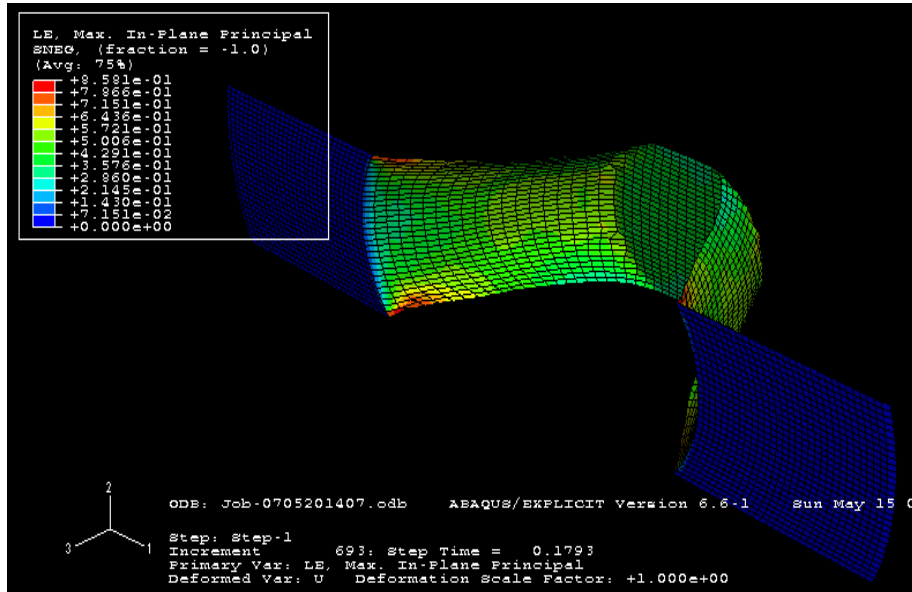


Figure 73: distribution des déformations dans tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm

La figure ci-dessus représente la distribution des déformations sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm, on voit bien que les déformations sont concentrées au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, puis au milieu de la surface libre.

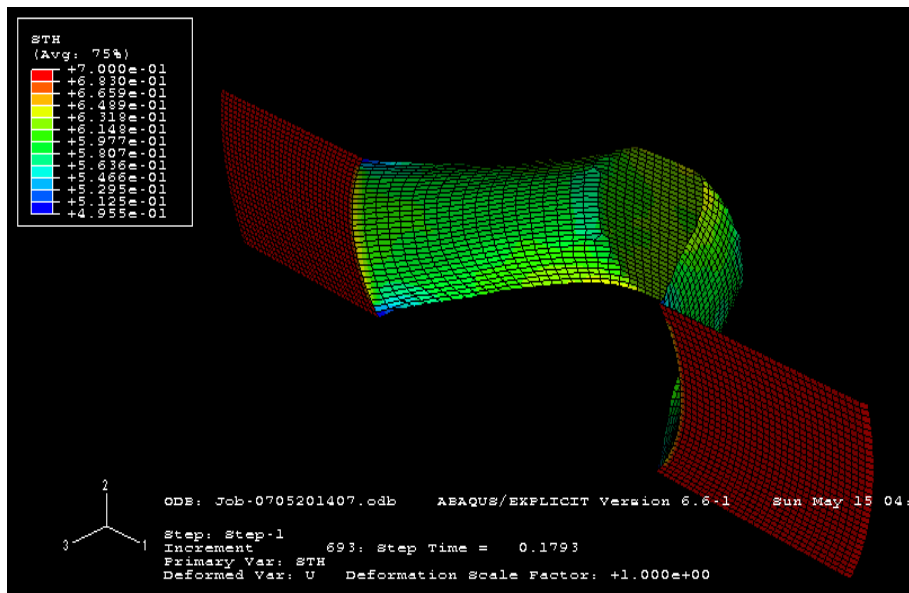


Figure 74: Amincissement pour la tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm

La figure ci-dessus représente la distribution de l'amincissement sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm, on voit bien que l'amincissement est plus grand au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, puis du côté du poinçon.

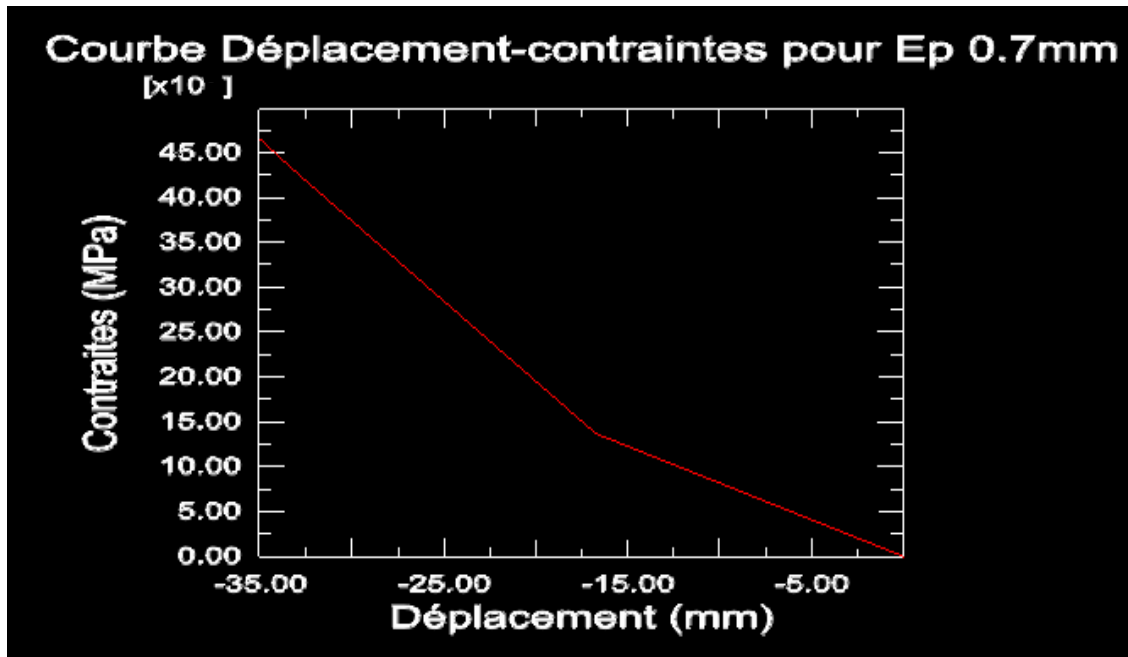


Figure 75: Courbe contraintes-déplacements pour l'embouti d'épaisseur 0.7 mm

La figure ci-dessus représente l'évolution des déplacements et des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.7mm, on voit bien que les contraintes sur la tôle augmentent avec l'augmentation du déplacement du poinçon.

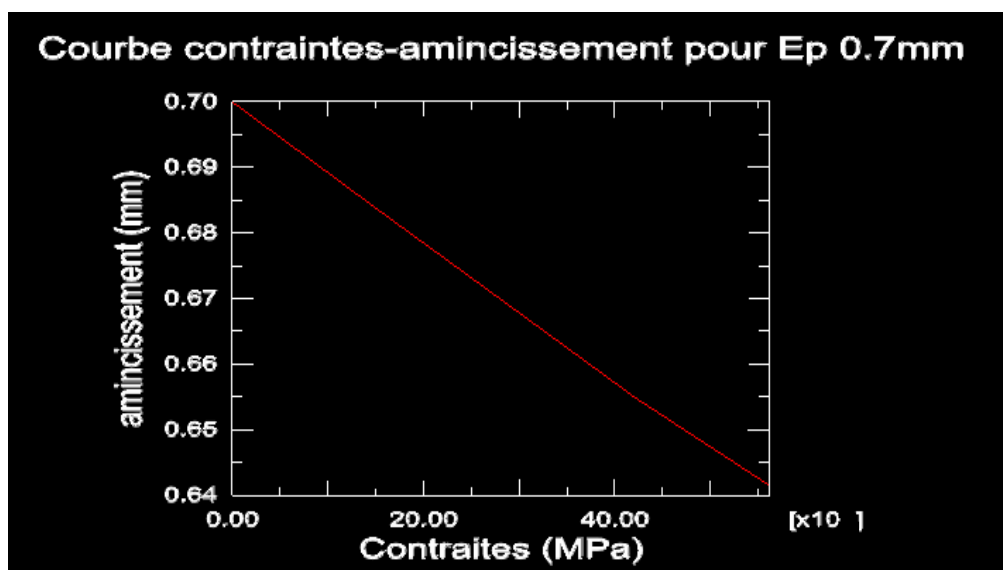


Figure 76 : Amincissement en fonction de la contrainte pour l'embouti d'épaisseur 0.7 mm.

La figure ci-dessus représente l'évolution de l'amincissement en fonction des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 0.7 mm, nous remarquons que l'épaisseur de la tôle diminue avec l'augmentation des contraintes, la tendance de la courbe est presque linéaire.

3) Simulation de la tôle d'épaisseur 1 mm :

Pour la simulation de l'opération d'emboutissage sur tôle d'épaisseur 1 mm, on a posé les conditions suivantes : Tôle du 240 mm x 60 mm et d'épaisseur 1 mm, module d'Young $E = 2.2 \cdot 10^{11}$ MPa, coefficient de Poisson 0.3.

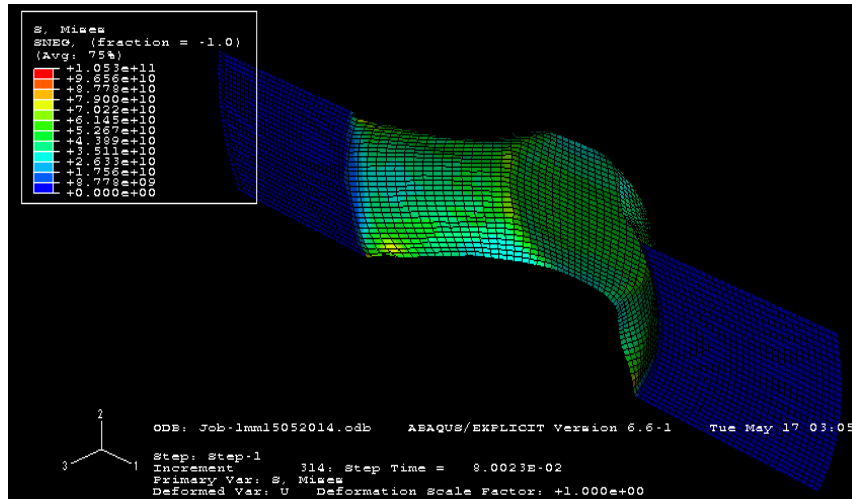


Figure 77: Distribution des contraintes dans tôle emboutie d'épaisseur 1 mm

La figure ci-dessus représente la distribution des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 1 mm, on note que les contraintes sont intéressantes au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, et à côté du poinçon, et plus petite au milieu de la surface libre.

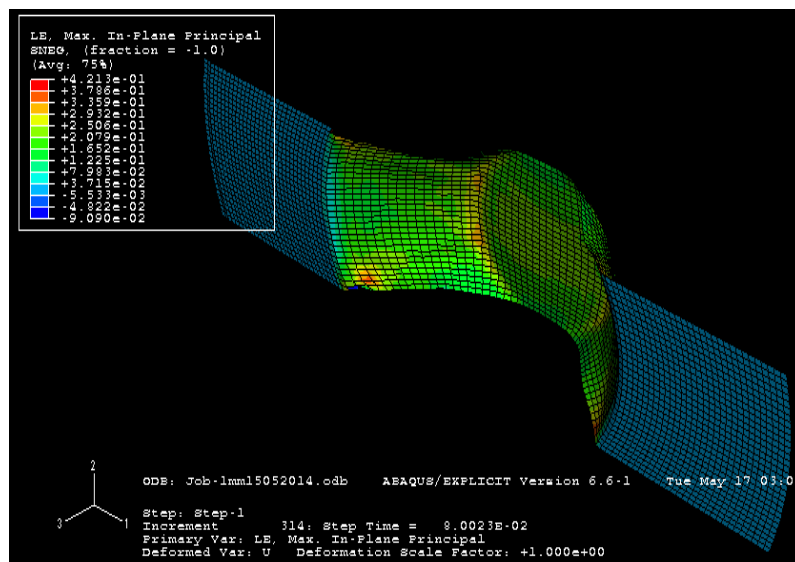


Figure 78 : Distribution des déformations dans la tôle emboutie d'épaisseur de 1 mm

La figure ci-dessus représente la distribution des déformations sur la tôle emboutie d'épaisseur 1 mm, on voit bien que les déformations sont semblables sur la zone de déformation sauf au niveau des côtés de l'embouti proche du serre flan, tandis que du côté du poinçon, la déformation est plus grande.

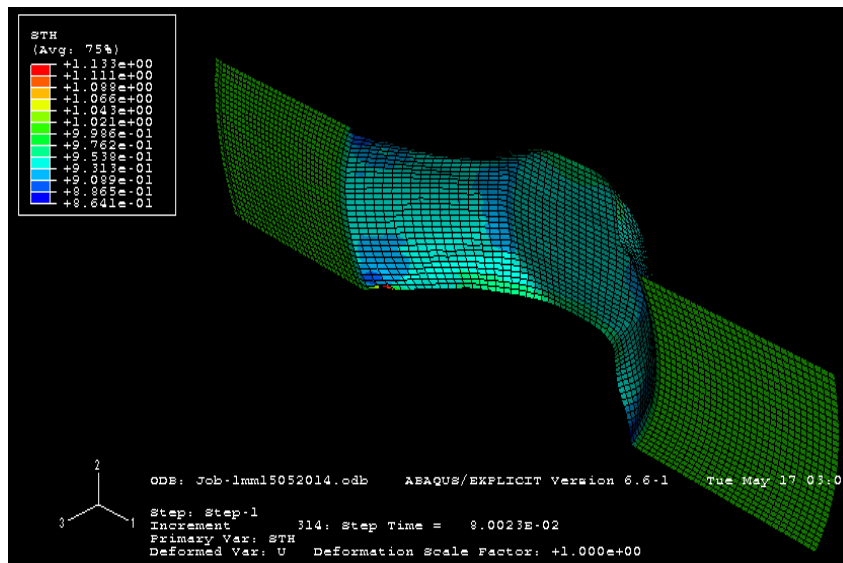


Figure 79: Amincissement dans tôle emboutie d'épaisseur 1 mm

La figure ci-dessus représente la distribution de l'amincissement sur la tôle emboutie d'épaisseur 1 mm, on voit bien que l'amincissement est plus grand au niveau des côtés de l'embouti proches du serre flan, et à côté du poinçon.

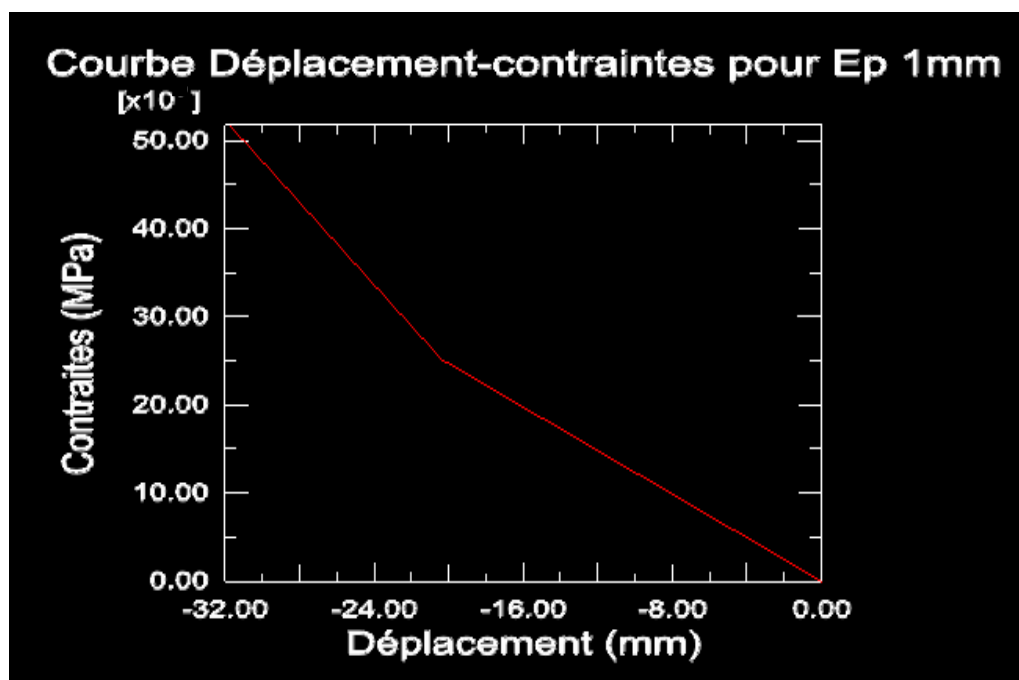


Figure 80: Courbe contrainte en fonction du déplacement pour l'embouti d'épaisseur 1mm.

La figure ci-dessus représente l'évolution des déplacements et des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 1 mm, on voit bien que les contraintes sur la tôle augmentent avec l'augmentation du déplacement du poinçon.

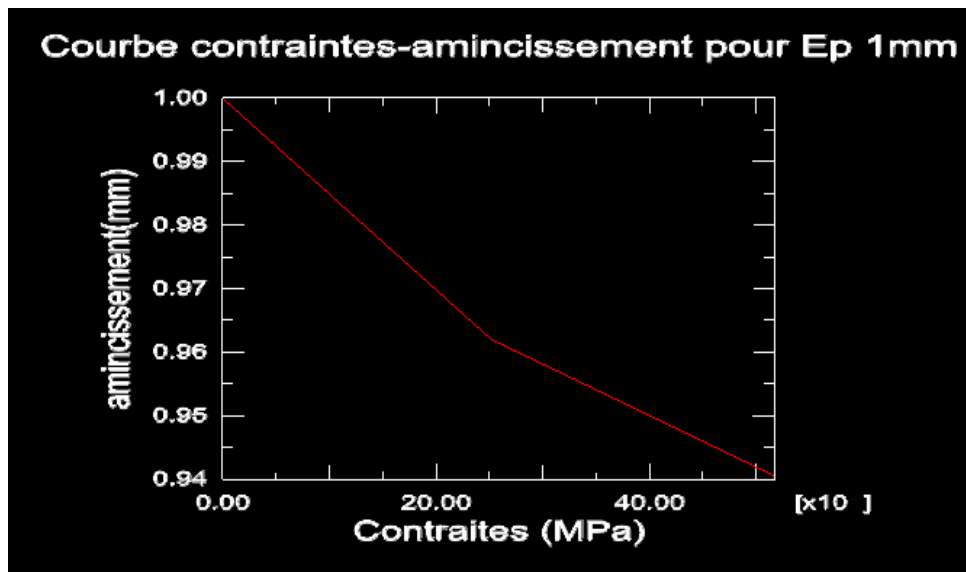


Figure 81: Courbe amincissement en fonction de la contrainte
Pour l'embouti d'épaisseur 1 mm

La figure ci-dessus représente l'évolution de l'amincissement en fonction des contraintes sur la tôle emboutie d'épaisseur 1 mm, nous remarquons que l'épaisseur de la tôle diminue avec l'augmentation des contraintes.

IV-4 La méthode des lignes de glissement:

Lors de l'opération de l'emboutissage, le poinçon exerce une pression sur la surface supérieure au milieu de la tôle, donc l'ensemble poinçon, tôle et serre flan forment un cône, on peut construire le champ des lignes de glissement à chaque coin de poinçon (o et o') avec éventail centré à chacun de ces deux points (champ semi-homogène) comme l'indique la figure ci-dessous :

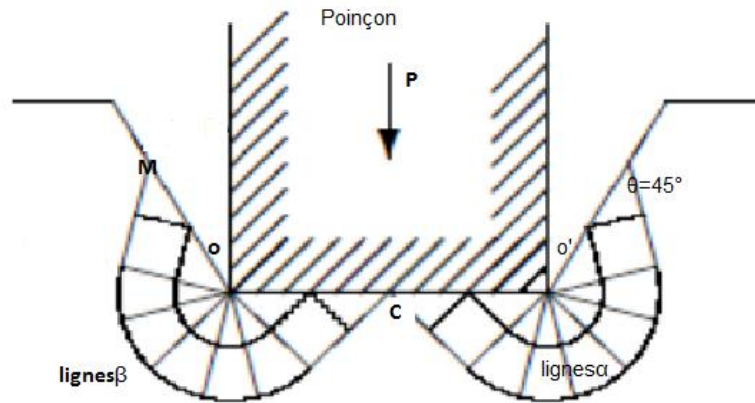


Figure 82: le champ des lignes de glissement

Où les lignes de glissement α sont des rayons issus des points o et o' et les lignes de glissement β sont des cercles de centres o et o'.

En utilisons la relation de Hencky pour les lignes de glissement β pour calculer la contrainte au niveau du point M :

On a

$p_M - 2k\theta_M = p_C - 2k\theta_C$ Pour la ligne de glissement β (CM) donc :

$$p_M = p_C - 2k\theta_C + 2k\theta_M$$

En suite : $p_M = p_C + 2k(\theta_M - \theta_C)$

Les lignes de glissement doivent faire des angles de 45° par rapport aux surfaces dans les points C, M ; donc l'angle tourné d'entre C et M en radians est :

$$\frac{\pi}{2} (|\theta_m - \theta_c| = \pi/2) \quad [\text{Chapitre II paragraphe II-2-1}]$$

Donc la relation de Hencky est de forme:

$p_M = p_C + \pi k$ Avec p_C est la contrainte appliqué au point C, $k = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$

Maintenant on calcule la contrainte au point M par les relations suivantes, On a:

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{xy}}{3}$$

Et

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = p_M + k \sin 2\theta_M \\ \sigma_{yy} = p_M - k \sin 2\theta_M \\ \sigma_{xy} = k \cos 2\theta_M \end{cases}$$

Donc $\sigma_M = 0.66 p_M$

IV-5 Les résultats obtenus :

Dans cette partie on a comparé les résultats de calcul des lignes de glissement avec les résultats obtenus par la simulation de l'opération d'emboutissage en 2D avec le code ABAQUS, les résultats sont présentés par les courbes suivantes :

- Pour tôle d'épaisseur 0.5 mm :

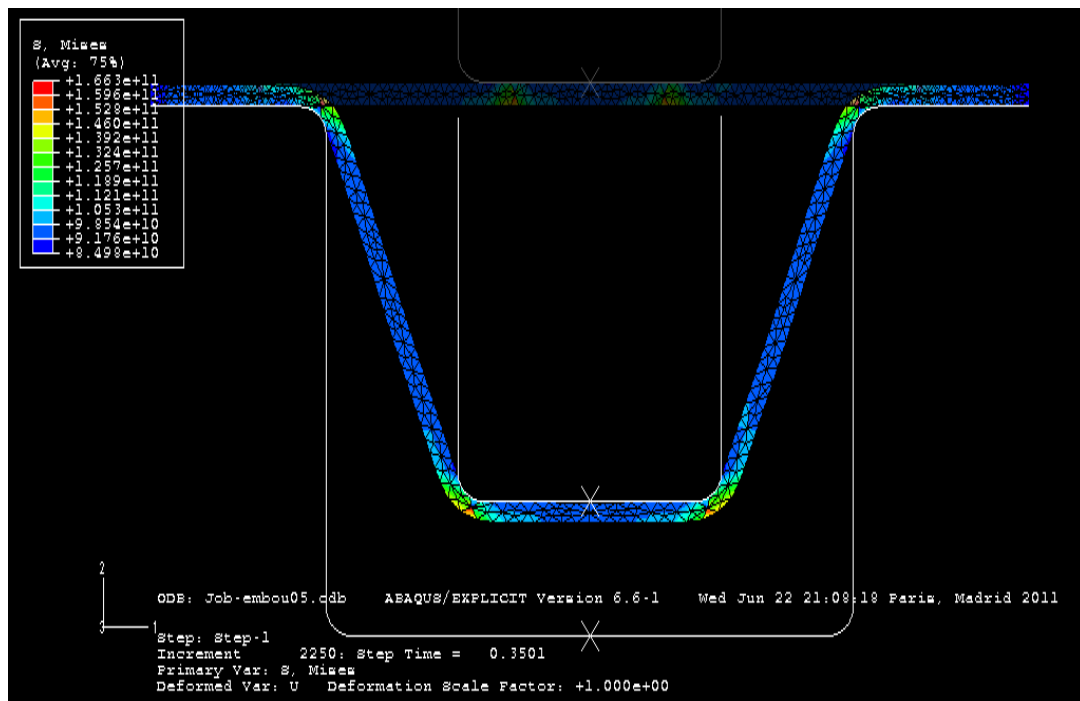


Figure 83 : Tôle emboutie d'épaisseur 0.5 mm par le code Abaqus.

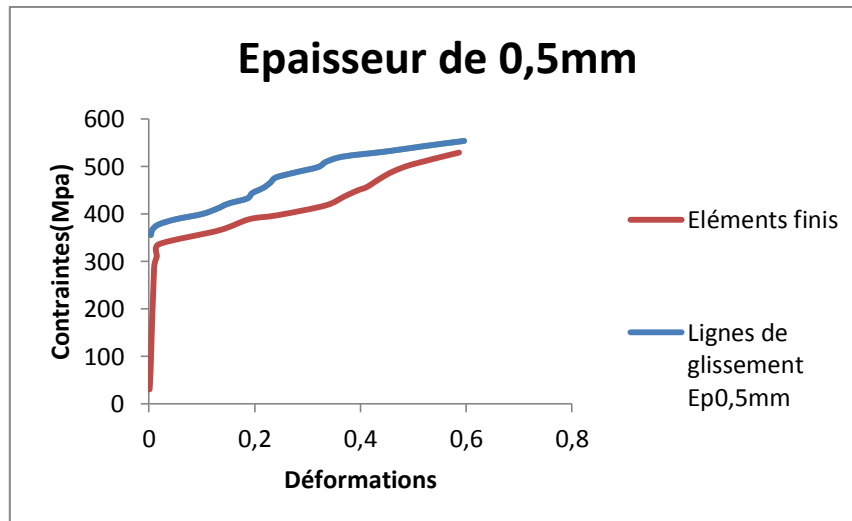


Figure 84: Courbes Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 0.5 mm

La figure ci-dessus représente les Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 0.5 mm pour la simulation avec ABAQUS et le calcul par la méthode des lignes de glissement, on voit bien que les courbes sont presque semblables, la seule différence est que le début des courbes est déplacé puis elles s'approchent pour les grandes déformations. On peut aussi remarquer que la déformation augmente avec l'augmentation de la contrainte.

- Pour tôle d'épaisseur 0.7 mm :

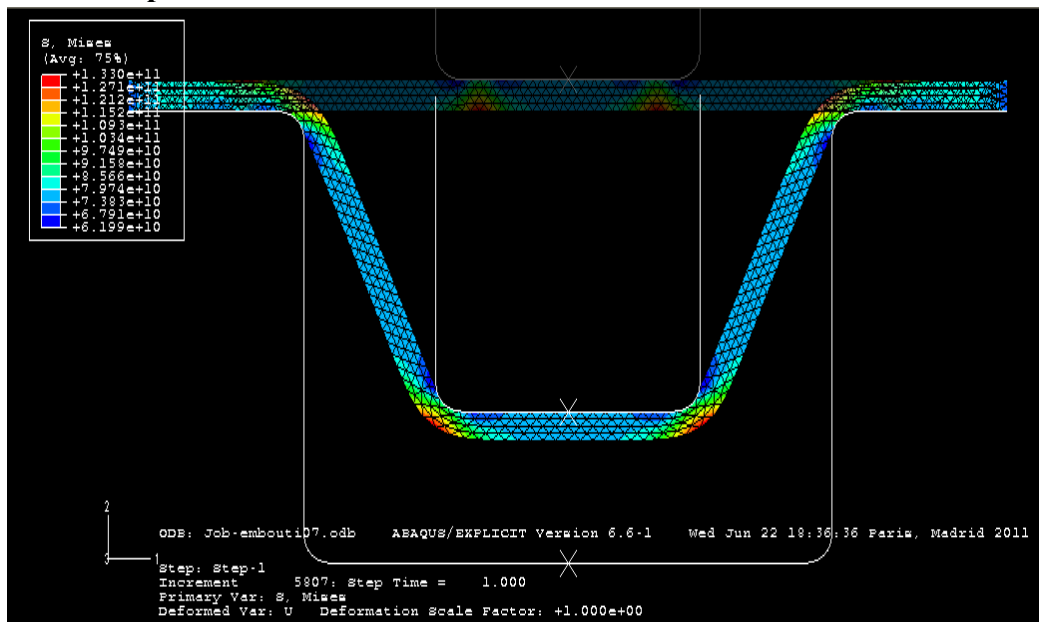


Figure 85 : Tôle embouti d'épaisseur 0.7mm par le code Abaqus.

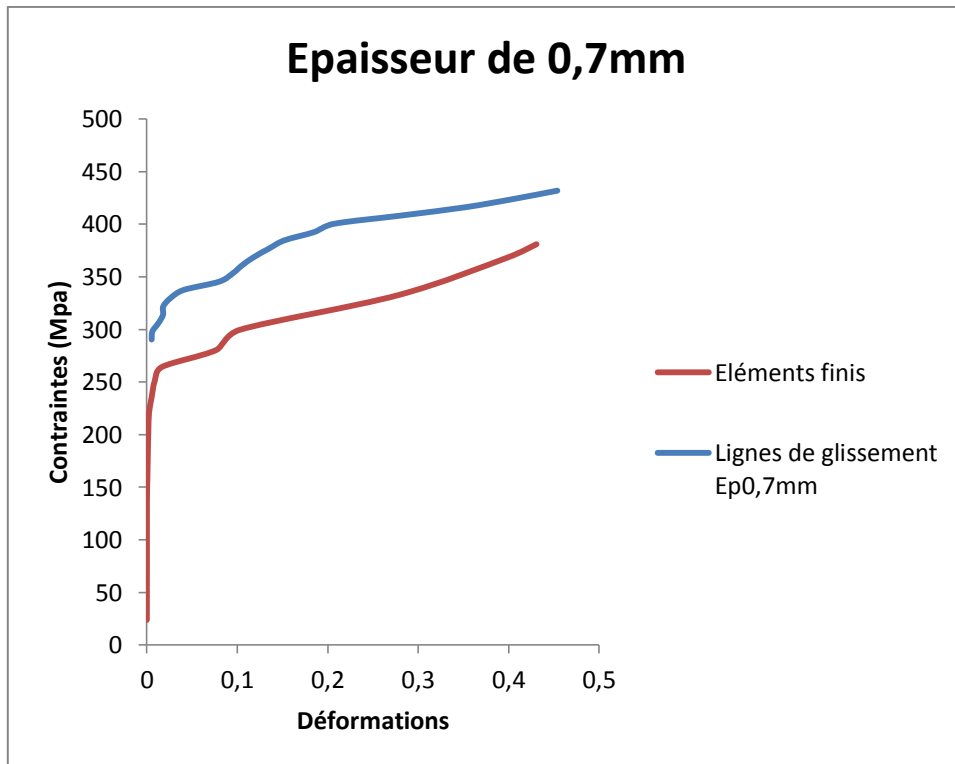


Figure 86: Courbes Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 0.7 mm

La figure ci-dessus représente les Courbes Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 0.7 mm pour la simulation avec ABAQUS et celui par la méthode des lignes de glissement, on voit bien que les courbes sont éloignées au début, mais ils se rapprochent jusqu'à l'intersection des courbes et restent semblables. Aussi nous remarquons que la déformation augmente avec la croissance de la contrainte.

- Pour tôle d'épaisseur 1mm :

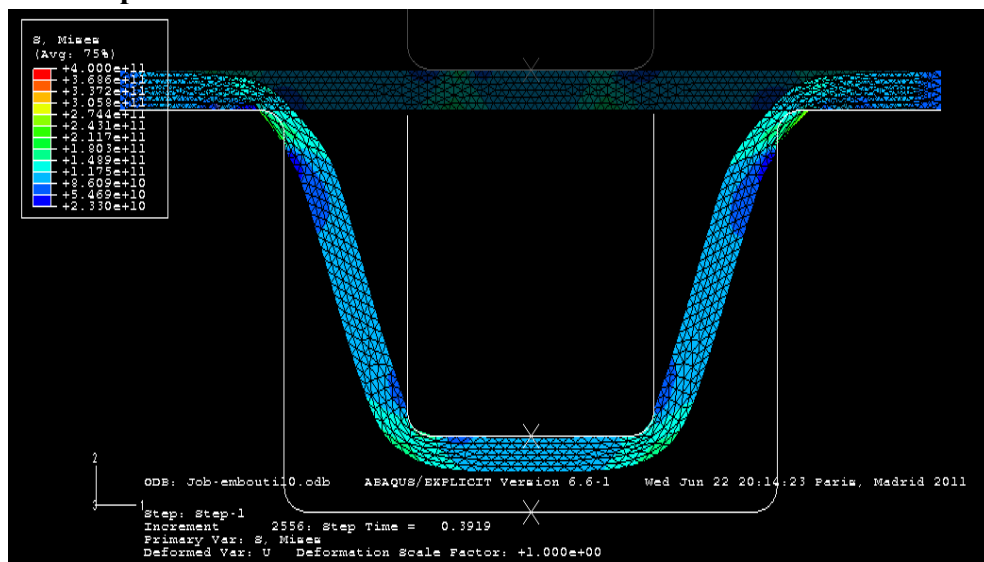


Figure 87: Tôle emboutie d'épaisseur 1 mm par le code Abaqus.

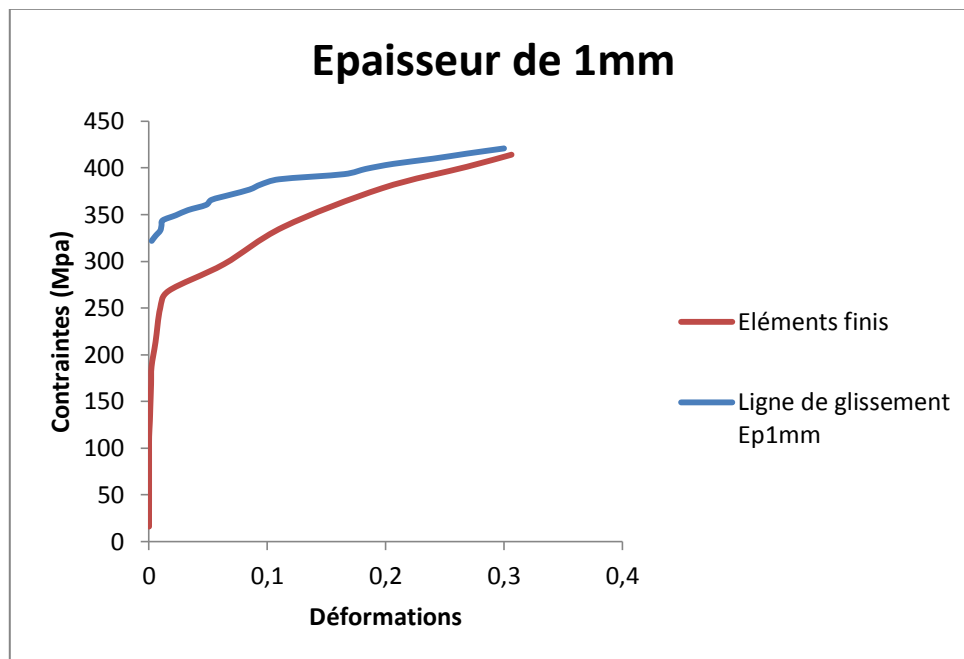


Figure 88 : Courbes Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 1 mm

La figure ci-dessus représente les Courbes Contrainte en fonction de la déformation pour la tôle d'épaisseur 1 mm pour la simulation avec ABAQUS et celle par la méthode des lignes de glissement, nous remarquons que les courbes sont éloignées au début, ensuite ils se rapprochent légèrement. On peut dire que la déformation augmente avec l'augmentation de la contrainte.

IV-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait une simple simulation de l'opération de l'emboutissage avec la méthode des lignes de glissement qui est basée sur le calcul en déformation plane et une simulation avec le code ABAQUS en 2D et 3D, et on a comparé les résultats des calculs avec les résultats de la simulation 2D avec ABAQUS de notre essai d'emboutissage pour les trois types de tôles d'épaisseurs (0.5, 0.7 et 1 mm).

Pour la simulation par la méthode des lignes de glissement on a utilisé les conditions des essais expérimentaux pour trouver les mêmes hypothèses, ces conditions sont les charges appliquées pour chaque tôle.

A partir des résultats qui ont été présentés on note que :

- Les déformations de la tôle avec différents épaisseurs de simulations effectuées par la méthode des lignes de glissement ou par éléments finis augmentent avec l'augmentation des contraintes appliquées sur la tôle. Aussi plus l'épaisseur est grande bien sur l'effort appliqué doit être plus grand en conséquence des contraintes élevées.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale :

Au cours de ces dernières années, de nombreuses recherches ont été consacrées au domaine de l'emboutissage.

Cette recherche est basée sur une étude expérimentale et un calcul numérique avec la méthode des lignes de glissement et une simulation numérique par le code ABAQUS.

Dans les deux premiers chapitres, on a fait une étude bibliographique sur l'opération de mise en forme des tôles minces telles que l'emboutissage et le pliage, dans le deuxième chapitre nous avons fait un rappel sur la méthode de calcul de la déformation plane en l'occurrence la méthode du champ des lignes de glissement.

Le troisième chapitre on a fait des expérimentations en commençant par la détermination module d'élasticité longitudinal, la limite d'élasticité, la contrainte de rupture, et la charge maximale du matériau utilisé pour cette recherche (acier XC52) pour trois différentes épaisseurs de tôles minces (0.5, 0.7 et 1 mm) avec les deux orientations de laminage (dans le sens de laminage et perpendiculairement au sens du laminage). Après les essais de caractérisation mécanique des tôles nous avons fait des essais d'emboutissage sur les tôles minces qui sont découpées au niveau du laboratoire de mécanique, dans ces essais on a déterminé la force de chargement et le déplacement du poinçon pour chaque épaisseur. Ensuite on a mesuré l'amincissement des tôles avant et après les essais au niveau des points choisis avec le mesureur de l'épaisseur (MD4 DL), de même on fait quelques mesures sur la géométrie des tôles embouties telles que la largeur, la hauteur et la concavité. Pendant les essais on a mesuré la déformation à l'aide de jauges de déformations qui collée au milieu des surfaces libres des tôles (surface entre poinçon et serre flan).

Dans le quatrième chapitre on fait une simulation numérique par le code ABAQUS et on a confronté les résultats de la simulation avec ABAQUS avec les résultats du calcul numérique par la méthode des lignes de glissement :

On peut conclure après cette recherche que:

- Les forces de chargement du poinçon augmentent avec l'épaisseur, si l'épaisseur est plus grande donc la force du poinçon devient plus grande.
- Le déplacement du poinçon est directement proportionnel à la force du chargement jusqu'à la rupture, et il est inversement proportionnel à l'épaisseur cela veut dire si l'épaisseur augmente le déplacement du poinçon diminué.
- Pour les résultats de mesure de l'épaisseur pour chaque tôle dans les différents points on peut noter que l'amincissement est plus grand dans les points situés au milieu des

surfaces libres (surface entre poinçon et serre flan) par rapport aux points proches du serre flan et du poinçon.

- La déformation au milieu des surfaces libres devient plus grande si l'épaisseur de l'embouti est grande.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

- *[1] A. Col, Tôles pour mise en forme. Travail des métaux en feuilles. Assemblages, Techniques de l'Ingénieur, Vol. B7-II, art BM 7520, Paris, 1996. 14 p.
- *[2] F. Ronde-Ousteau, Conception et mise au point d'une gamme d'emboutissage. Travail des métaux en feuille. Assemblage, Techniques de l'Ingénieur, Vol. B7-II, art. B 7540, Paris, 1977.
- *[3] M. Burlat, Analyse mécanique et tribologique de l'emboutissage : application aux outils fabriqués par combinaison de différents matériaux, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- *[4] H. Zein, Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Drawing Process, American Journal of Mechanical Engineering, 2013, Vol. 1, No. 2, 20-29.
- *[5] Colgan, M., and Monaghan, J., "Deep Drawing Process: Analysis and Experiment," Journal of Materials Processing Technology, 132, 35-41, 2003.
- *[6] Demirci.I, "The Theoretical and Experimental Investigation of Blank Holder Forces Plate Effect in Deep Drawing Process of AL 1050 Material," Journal of Materials & Design, 29(2), 526-532, 2008.
- *[7] Jawad, W "Investigation of Contact Interface between the Punch and Blank in Deep Drawing Process," Journal of Engineering and Technology, 25(3), 370-382, 2007.
- *[8] M. AZAOUZI : « Modélisation et optimisation numérique de l'emboutissage de pièces de précision en tôlerie fine »" École doctorale EMMA Lorraine ,soutenance le 11 Décembre 2007
- *[9] R. BAHLOUL, " Optimisation du procédé de pliage sur presses de pièces en tôles à haute limite d'élasticité" Ecole doctorale sciences des métiers de l'ingénieur Date de soutenance : 01 décembre 2005.
- *[10] SKLAD, M.P., YUNG BLUD, B.A. "Analysis of multi-operation sheet forming processes", Numiform 92, p. 543-547, 1992.
- *[11] M.S. Chebbah "parameters optimization of springback in sheet metal forming by response surface method" Courier du Savoir – N°13, Avril 2012, pp89-95.
- *[12] A. Assempour and A. Fathi EVALUATION OF FORMING SEVERITY AND THICKNESS VARIATION IN DEEP DRAWING PROCESS Department of Mechanical

BIBLIOGRAPHIE

Engineering, Center of Excellence in Design Robotics and Automation, Sharif University of Technology Tehran, Iran

*[13] F.ABBASSI “ ANALYSIS OF THE THINNING PHENOMENON VARIATIONS IN SHEET METAL FORMING PROCESS” IX International Conference on Computational Plasticity, © CIMNE, Barcelona, 2007.

*[14]. R.NARAYANASAMY “ Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thickness” Journal of Materials and Design 9 November 2006

*[15] P.H.MATIN “ Practical limitations to the influence of through-thickness normal stress on sheet metal formability” International Journal of Plasticity 21 (2005) 671–690.

*[16] J.R RICE “PLANE STRAIN SLIP LINE THEORY FOR ANISOTROPIC RIGID/PLASTIC MATERIALS” Division of Engineering, Brown University, Providence, Rhode Island, U.S.A. (Received 11 th September 1972)

*[17] Lian.J1989 “Plastic behavior and stretchability of sheet metals. PartII: Effect of yield surface shape on sheet forming limit”. International Journal of Plasticity 5 (2), 131–147.

*[18] Friedman and Pan 2000 “Effect of plastic anisotropy and yield criteria on prediction of forming limit curves”. International Journal of Mechanical Sciences 42 (1), 29–48.

*[19] Yao and Cao, 2002” Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress.” International Journal of Plasticity 18 (8), 1013–1038.

*[20] Cao 2000” Prediction of localized thinning in sheet metal using a general anisotropic yield criterion”. International Journal of Plasticity 16 (9), 1105–1129.

*[21] Yann LEDOUX ” Optimisation des procédés d’emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques” Thèse de doctorat Date de soutenance : 12 décembre 2005

*[22] Cunat J.P, "Aciers inoxydables – Mise en œuvre", Technique de l’ingénieur, M 4 542 – 1 – 24, Septembre 2000.

*[23] R. Martin. ”Formage `a la presse”. Techniques de l’ingénieur ” travail des métaux en feuilles ” mai 1995, B 7510-4.

*[24] L. GRISARD, "Modélisation bidimensionnelle de la mise en forme de tôles par la méthode des éléments finis", Thèse de Doctorat, Université de Liège, 1992.

*[25] Ecole Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Enseignement et de Recherche de CLUNY "Cours de Mécanique des Milieux Continus"

*[26] L.P. AULNOYE « Construction Mécanique appliquée : cours et applications. »

BIBLIOGRAPHIE

- *[27] Nagtegaal, J. C., and L. M. Taylor, "Comparison of Implicit and Explicit Finite.
- *[28] Prandtl , [1920], Gottinger Nachr. Math.-Phys. Kl., 74.
- *[29] Hencky, [1923], Z. angew. Math. Mech. 3, 241.
- *[30] Mises, [1913], Gottinger Nachr. Math.-Phys. Kl., 582.
- *[31] Mandel.J, [1964], in Stress Waves in Anelastic Solids(IUTAM Symp., Providence, 1963, ed. H. Kolsky and W. Prager), Springer-Verlag, Berlin, p. 331.
- *[32] Jacob Lubliner " PLASTICITY THEORY" University of California at Berkeley.
- *[33] Geiringer, [1931], in Proc. 3rd Int. Cong. Appl. Mech. (Stockholm, 1930), Vol. 2, p. 185.

- *[34] ASTM E08M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric] (Withdrawn 2008)

- *[35] Mr. S Ellagoune et M. Boivin " Critère d'apparition des plis en emboutissage " Mémoires et études scientifiques de la revue de métallurgie, ISSN 0245-8292, Coden MESMDJ, FRA, DA. 1988, vol 85, N° 4, pp211-221.

ANNEXES

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 0.5mm essai2

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
-1.160714	-0.1160714	-3.20E-05	-5.70E-03	0.2462656	1695.255	169.5255	0.041316	0.0769975	10.24527
-1.160714	-0.1160714	-3.20E-05	-5.70E-03	0.2462656	1721.576	172.1576	4.19E-02	0.0781375	10.35527
-2.022485	-0.2022485	4.60E-05	-5.54E-03	1.280266	1771.216	177.1216	0.043348	8.11E-02	10.46527
-2.157703	-0.2157703	7.20E-05	-5.49E-03	2.336266	1820.526	182.0526	0.044518	8.34E-02	10.57527
-2.50423	-0.250423	8.80E-05	-5.46E-03	3.425266	1863.597	186.3597	0.046398	8.72E-02	10.68527
9.969468	0.9969468	3.72E-04	-4.89E-03	3.949266	1902.064	190.2064	0.048014	9.04E-02	10.79527
15.44052	1.544052	4.06E-04	-4.82E-03	4.635266	1937.732	193.7732	0.04943	9.32E-02	10.90527
24.02524	2.402524	1.40E-03	-0.0028385	4.745265	1969.626	196.9626	0.051326	9.70E-02	11.01527
34.13474	3.413474	2.38E-03	-8.75E-04	4.855266	1995.825	199.5825	0.05245	9.93E-02	11.12527
46.29036	4.629036	5.47E-03	5.30E-03	4.965266	2014.929	201.4929	0.053858	0.1020815	11.23527
65.84184	6.584184	2.18E-03	-1.27E-03	5.075265	2024.472	202.4472	0.05458	0.1035255	11.34527
114.9725	11.49726	-6.38E-04	-6.91E-03	5.185266	2028.655	202.8654	0.055398	0.1051615	11.45527
164.4665	16.44665	2.40E-04	-5.15E-03	5.295266	2031.18	203.118	0.056268	0.1069015	11.56527
213.4609	21.34609	2.07E-03	-1.49E-03	5.405266	1879.069	187.9069	0.054446	0.1032575	12.66527
265.4718	26.54718	4.37E-03	3.11E-03	5.515265	1800.098	180.0098	0.053864	0.1020935	13.76527
321.2808	32.12808	6.35E-03	7.07E-03	5.625266	1846.894	184.6894	0.054514	0.1033935	13.87527
379.6269	37.96269	0.007932	1.02E-02	5.735266	1902.142	190.2142	0.055466	0.1052975	13.98527
439.0528	43.90528	9.44E-03	1.33E-02	5.845265	1960.171	196.0171	0.056534	0.1074335	14.09527
501.4673	50.14672	0.011374	1.71E-02	5.955266	2019.323	201.9323	0.057862	0.1100895	14.20527
563.1476	56.31476	0.013198	2.08E-02	6.065266	2071.368	207.1368	0.059374	0.1131135	14.31527
626.0226	62.60226	0.014586	2.35E-02	6.175266	2113.749	211.3749	0.061118	0.1166015	14.42527
689.0339	68.90339	0.016388	2.71E-02	6.285265	2145.684	214.5684	0.063104	0.1205735	14.53527
744.662	74.4662	0.017446	2.93E-02	6.395266	2170.601	217.0601	0.065364	0.1250935	14.64527
792.4565	79.24565	0.018496	0.0313575	6.505266	2195.22	219.522	0.067582	0.1295295	14.75527
838.1573	83.81573	0.019522	0.0334095	6.615266	2216.999	221.6999	0.070372	0.1351095	14.86527
884.8066	88.48067	0.02049	3.53E-02	6.725266	2235.782	223.5782	0.073316	0.1409975	14.97527
932.8942	93.28941	2.14E-02	0.0372495	6.835266	2253.243	225.3243	0.076136	0.1466375	15.08527
980.8461	98.08461	2.24E-02	0.0392215	6.945266	2268.905	226.8905	0.078946	0.1522575	15.19527
1029.437	102.9437	0.023412	0.0411895	7.055265	2283.771	228.3771	0.082024	0.1584135	15.30527
1075.648	107.5648	0.024548	4.35E-02	7.165266	2296.392	229.6392	8.51E-02	0.1644975	15.41527
1116.02	111.602	0.026572	4.75E-02	7.275266	2308.143	230.8143	0.088246	0.1708575	15.52527
1161.172	116.1172	0.028368	5.11E-02	7.385266	2318.919	231.8919	0.091374	0.1771135	15.63527
1209.26	120.926	0.029318	5.30E-02	7.495265	2328.087	232.8087	0.0944	0.1831655	15.74527
1257.834	125.7834	0.030358	0.0550815	7.606266	2335.813	233.5813	9.76E-02	0.1894815	15.85527
1302.022	130.2022	0.031446	5.73E-02	7.715266	2343.414	234.3414	0.100942	0.1962495	15.96527
1346.016	134.6016	0.03261	5.96E-02	7.825265	2350.824	235.0824	0.10428	0.2029255	16.07527
1393.833	139.3833	0.033548	0.0614615	7.935266	2358.802	235.8802	0.107392	0.2091495	16.18527
1442.041	144.2041	0.034414	6.32E-02	8.045265	2363.829	236.3829	0.110458	0.2152815	16.29527
1487.053	148.7053	0.035402	6.52E-02	8.155266	2369.159	236.9159	0.113728	0.2218215	16.40527
1526.647	152.6647	0.03641	6.72E-02	8.265265	2374.153	237.4153	0.116946	0.2282575	16.51527
1565.052	156.5052	0.037356	6.91E-02	8.375266	2379.672	237.9672	0.120194	0.2347535	16.62527
1602.115	160.2115	0.038066	7.05E-02	8.485266	2383.586	238.3586	0.123322	0.2410095	16.73527
1632.951	163.2951	0.03847	7.13E-02	8.595265	2388.153	238.8153	0.126378	0.2471215	16.84527
1659.139	165.9139	0.03939	7.31E-02	8.705266	2391.863	239.1863	0.129414	0.2531935	16.95527
1676.638	167.6638	3.97E-02	0.0737735	8.815266	2395.863	239.5863	0.132438	0.2592415	17.06527
1683.986	168.3986	0.040334	7.50E-02	8.925265	2399.614	239.9614	0.13569	0.2657455	17.17527
1686.816	168.6816	0.040514	7.54E-02	9.035265	2402.83	240.283	0.138866	0.2720975	17.28526
1688.97	168.897	0.040668	7.57E-02	9.145266	2404.86	240.486	0.141908	0.2781815	17.39527
1691.33	169.133	0.040986	7.63E-02	9.255266	2409.202	240.9202	0.145088	0.2845415	17.50627

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
3797.128	379.7128	18.69846	1.999197	280.3503	3799.588	379.9588	21.04368	1.999197	311.2603
3797.184	379.7184	18.76819	1.999197	281.1793	3798.491	379.8491	21.097	1.999197	312.2503
3794.888	379.4888	18.82195	1.999197	281.9453	3797.532	379.7532	21.15896	1.999197	313.0203
3796.066	379.6066	18.87087	1.999197	282.1653	3799.011	379.9011	21.20115	1.999197	313.4053
3796.273	379.6273	18.92156	1.999197	283.0453	3799.31	379.931	21.26414	1.999197	314.0653
3795.661	379.5661	18.97209	1.999197	283.9253	3800.424	380.0424	21.29109	1.999197	314.7253
3795.719	379.5719	19.02454	1.999197	284.5853	3800.401	380.0401	21.35803	1.999197	315.1653
3795.81	379.581	19.08576	1.999197	284.9153	3799.524	379.9525	21.41911	1.999197	316.1553
3797.565	379.7565	19.09734	1.999197	285.6303	3798.886	379.8886	21.47845	1.999197	317.1453
3797.735	379.7735	19.15066	1.999197	286.0703	3798.195	379.8195	21.54055	1.999197	318.0803
3798.811	379.881	19.17263	1.999197	286.9503	3797.532	379.7532	21.60647	1.999197	318.9603
3796.646	379.6646	19.23738	1.999197	287.2803	3796.868	379.6868	21.65657	1.999197	319.2903
3798.361	379.8361	19.23928	1.999197	287.3903	3798.212	379.8212	21.65847	1.999197	319.7303
3798.559	379.8559	19.30813	1.999197	287.9403	3797.363	379.7363	21.71105	1.999197	320.2803
3796.486	379.6486	19.36145	1.999197	288.9303	3797.093	379.7093	21.76892	1.999197	321.0503
3797.081	379.7081	19.44378	1.999197	289.8653	3795.9	379.59	21.82004	1.999197	321.8753
3796.202	379.6202	19.51584	1.999197	290.9653	3798.489	379.8489	21.87087	1.999197	322.0953
3796.202	379.6202	19.51584	1.999197	290.9653	3799.645	379.9644	21.87673	1.999197	322.5353
3795.696	379.5696	19.57282	1.999197	292.0653	3797.351	379.7351	21.93782	1.999197	323.0853
3795.696	379.5696	19.57282	1.999197	292.0653	3796.868	379.6868	21.98791	1.999197	323.8553
3797.106	379.7106	19.60886	1.999197	292.5053	3795.188	379.5189	22.05911	1.999197	324.8453
3794.737	379.4737	19.66101	1.999197	292.9453	3796.277	379.6277	22.09587	1.999197	325.3443
3796.944	379.6944	19.67858	1.999197	293.2243	3794.452	379.4452	22.16546	1.999197	326.0003
3798.157	379.8157	19.68005	1.999197	293.5503	3792.225	379.2225	22.22815	1.999197	326.8803
3799.59	379.959	19.68093	1.999197	293.7703	3789.267	378.9267	22.303	1.999197	327.8703
3799.446	379.9446	19.74627	1.999197	293.9903	3785.389	378.5389	22.35325	1.999197	328.6403
3796.698	379.6698	19.80969	1.999197	294.7603	3780.125	378.0125	22.41931	1.999197	329.5753
3796.918	379.6918	19.88279	1.999197	295.6403	3768.718	376.8718	22.49269	1.999197	330.6753
3797.411	379.7411	19.95222	1.999197	296.6303	3768.718	376.8718	22.49269	1.999197	330.6753
3797.321	379.7321	20.01404	1.999197	297.5653	3757.852	375.7852	22.55481	1.999197	331.3353
3798.452	379.8452	20.03645	1.999197	297.8953	3743.165	374.3165	22.60505	1.999197	331.9953
3796.983	379.6983	20.08786	1.999197	298.5553	3723.32	372.332	22.67082	1.999197	332.6043
3798.09	379.809	20.11877	1.999197	298.9953	3686.293	368.6293	22.72429	1.999197	333.5903
3797.542	379.7542	20.17268	1.999197	299.4353	3666.453	366.6453	22.78802	1.999197	334.1403
3798.884	379.8884	20.19699	1.999197	300.3153	3623.092	362.3092	22.86243	1.999197	335.2403
3798.408	379.8409	20.25383	1.999197	300.6453	3623.092	362.3092	22.86243	1.999197	335.2403
3797.791	379.7791	20.29382	1.999197	301.6903	3573.928	357.3929	22.94914	1.999197	336.3403
3798.435	379.8434	20.34714	1.999197	302.3503	3573.928	357.3929	22.94914	1.999197	336.3403
3798.905	379.8905	20.40983	1.999197	302.6803	3520.309	352.0309	23.04157	1.999197	337.3893
3799.936	379.9936	20.47034	1.999197	303.5603	3520.309	352.0309	23.04157	1.999197	337.3893
3798.662	379.8662	20.52366	1.999197	304.2203	3481.673	348.1673	23.10105	1.999197	338.2653
3799.885	379.9886	20.58298	1.999197	305.1003	3422.198	342.2198	23.15334	1.999197	339.3653
3799.268	379.9268	20.63308	1.999197	305.9253	3422.198	342.2198	23.15334	1.999197	339.3653
3798.745	379.8745	20.69197	1.999197	306.4753	3390.778	339.0778	23.2115	1.999197	340.0253
3798.364	379.8364	20.76228	1.999197	307.2453	3362.424	336.2424	23.26555	1.999197	340.4653
3798.92	379.892	20.82365	1.999197	308.0153	3314.271	331.4271	23.31916	1.999197	341.2353
3798.871	379.8871	20.87801	1.999197	309.0053	3280.851	328.0851	23.38347	1.999197	341.9503
3799.415	379.9415	20.9281	1.999197	309.9403	3214.918	321.4919	23.43357	1.999197	343.0503
3799.817	379.9817	20.99168	1.999197	310.3803	3214.918	321.4919	23.43357	1.999197	343.0503

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 0.5mm essai 2 transversal de sens de laminage

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
0.2306543	2.31E-02	2.01E-06	1.04E-02	0.3049062	1872.416	187.2416	6.53E-02	0.1410039	8.589907
-0.700201	-7.00E-02	4.00E-06	1.04E-02	0.6289063	1863.202	186.3202	6.60E-02	0.1424754	9.156203
48.68779	4.868779	2.36E-05	1.04E-02	1.350832	1895.905	189.5905	6.73E-02	0.1449715	9.505216
108.1783	10.81783	1.10E-04	1.06E-02	1.838857	1948.509	194.8509	6.89E-02	0.1481682	9.723857
173.5068	17.35068	3.68E-04	1.11E-02	2.131326	2005.016	200.5016	7.09E-02	0.152125	9.879728
246.3114	24.63114	8.05E-04	1.20E-02	2.320969	2056.33	205.633	7.32E-02	0.1568757	10.00824
326.6287	32.66287	1.56E-03	1.35E-02	2.46379	2099.149	209.9149	7.60E-02	0.1623157	10.12548
411.8198	41.18198	2.71E-03	1.58E-02	2.586822	2134.186	213.4185	7.89E-02	0.1682358	10.23825
495.2763	49.52763	4.08E-03	1.85E-02	2.701863	2163.73	216.373	8.20E-02	0.1744772	10.3493
571.2042	57.12042	5.46E-03	2.13E-02	2.813776	2189.688	218.9688	8.53E-02	0.1809906	10.45968
639.4502	63.94502	6.75E-03	2.39E-02	2.92449	2213.138	221.3138	8.86E-02	0.1876122	10.56983
703.1044	70.31044	8.00E-03	2.64E-02	3.034755	2234.576	223.4576	0.0919425	0.1942669	10.67988
764.9645	76.49645	9.32E-03	2.90E-02	3.144851	2254.398	225.4398	9.53E-02	0.201025	10.7899
826.3831	82.63831	1.07E-02	3.17E-02	3.254887	2273.077	227.3077	9.88E-02	0.2079265	10.8999
887.5232	88.75232	1.20E-02	3.44E-02	3.364899	2290.877	229.0877	0.102304	0.2149899	11.0099
948.106	94.81059	0.0134096	3.72E-02	3.474904	2307.744	230.7744	0.1058689	0.2221196	11.11991
1007.793	100.7793	1.48E-02	4.01E-02	3.584905	2323.624	232.3624	0.1094446	0.2292711	11.22991
1066.469	106.6469	0.0163221	4.30E-02	3.694906	2338.655	233.8655	0.1130258	0.2364336	11.33991
1124.172	112.4172	1.78E-02	4.61E-02	3.804906	2352.714	235.2714	0.1166072	0.2435963	11.44991
1181.308	118.1308	1.94E-02	0.0492554	3.914906	2365.531	236.5531	0.120209	0.2508	11.55991
1238.49	123.849	2.12E-02	5.27E-02	4.024906	2377.004	237.7004	0.1238077	0.2579972	11.66991
1295.24	129.524	2.30E-02	5.64E-02	4.134906	2387.066	238.7066	0.1274005	0.265183	11.77991
1349.806	134.9806	2.48E-02	6.00E-02	4.244906	2395.842	239.5842	0.1309826	0.2723472	11.88991
1399.563	139.9563	2.65E-02	6.35E-02	4.354906	2403.939	240.3939	0.1345275	0.2794369	11.99991
1441.787	144.1787	0.0281718	6.67E-02	4.464906	2411.857	241.1857	0.1380451	0.2864722	12.10991
1475.482	147.5482	2.96E-02	6.96E-02	4.574906	2419.469	241.9469	0.1415644	0.2935106	12.21991
1501.555	150.1555	3.08E-02	7.20E-02	4.684906	2426.713	242.6713	0.1451021	0.3005861	12.32991
1520.696	152.0696	3.18E-02	7.40E-02	4.794906	2433.642	243.3642	0.1486612	0.3077042	12.43991
1533.344	153.3344	3.25E-02	7.55E-02	4.935906	2439.933	243.9933	0.152243	0.3148679	12.54991
1541.519	154.1519	0.0331741	7.67E-02	5.128129	2445.099	244.5099	0.1558292	0.3220403	12.65991
1547.666	154.7666	3.37E-02	7.78E-02	5.31961	2449.144	244.9144	0.1594303	0.3292424	12.76991
1553.05	155.305	3.42E-02	7.88E-02	5.474351	2452.705	245.2705	0.1630289	0.3364398	12.87991
1558.067	155.8067	3.46E-02	7.95E-02	5.605124	2456.285	245.6285	0.1676426	0.3456671	13.02657
1562.821	156.2821	3.48E-02	0.0800228	5.724002	2460.086	246.0086	0.1740081	0.3583981	13.23435
1567.687	156.7687	3.51E-02	8.05E-02	5.837613	2463.948	246.3949	0.1803458	0.3710734	13.44213
1575.758	157.5758	3.55E-02	8.14E-02	5.949033	2467.368	246.7368	0.1853681	0.381118	13.60645
1594.148	159.4148	3.63E-02	8.31E-02	6.059579	2470.385	247.0385	0.1895398	0.3894616	13.7418
1627.361	162.7361	3.77E-02	8.58E-02	6.169785	2473.282	247.3282	0.1933177	0.3970173	13.86266
1671.373	167.1373	3.96E-02	8.96E-02	6.279862	2475.908	247.5908	0.1969382	0.4042584	13.97709
1718.697	171.8697	4.19E-02	9.42E-02	6.38989	2478.274	247.8274	0.2005333	0.4114485	14.08883
1765.006	176.5006	4.45E-02	9.93E-02	6.4999	2480.601	248.0601	0.204158	0.4186978	14.1995
1808.973	180.8973	4.72E-02	0.1048374	6.609904	2482.857	248.2857	0.2078023	0.4259865	14.30976
1850.37	185.037	5.01E-02	0.1106165	6.719906	2484.873	248.4873	0.2114878	0.4333574	14.41985
1889.45	188.945	5.31E-02	0.116569	6.829906	2486.571	248.6571	0.2152547	0.4408913	14.52989
1926.326	192.6326	5.61E-02	0.1226375	6.939906	2488.053	248.8053	0.2191023	0.4485865	14.6399
1960.976	196.0976	5.92E-02	0.1287528	7.049906	2489.502	248.9502	0.2230132	0.4564083	14.7499
1993.152	199.3152	6.22E-02	0.1348093	7.159906	2491.157	249.1157	0.2274272	0.4652362	14.87213
1991.385	199.1385	6.44E-02	0.1392407	7.379906	2493.087	249.3087	0.2326422	0.4756663	15.01472
1932.385	193.2385	6.51E-02	0.1406407	7.893239	2495.033	249.5033	0.2379216	0.486225	15.15731

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
3873.05	387.305	23.25457	2.05687	278.7066	3838.361	383.8361	26.12565	2.05687	310.0811
3872.994	387.2994	23.30942	2.05687	279.34	3836.375	383.6375	26.18812	2.05687	310.7137
3872.991	387.2991	23.36626	2.05687	279.967	3834.544	383.4544	26.25504	2.05687	311.4279
3872.721	387.2721	23.42414	2.05687	280.5346	3832.657	383.2657	26.32118	2.05687	312.1881
3872.082	387.2082	23.48381	2.05687	281.1061	3830.732	383.0732	26.38147	2.05687	312.9273
3871.592	387.1592	23.5484	2.05687	281.7663	3828.667	382.8667	26.43701	2.05687	313.58
3871.57	387.157	23.62078	2.05687	282.5341	3826.368	382.6368	26.49127	2.05687	314.1592
3871.782	387.1782	23.68964	2.05687	283.3025	3823.543	382.3543	26.54683	2.05687	314.7538
3872.065	387.2065	23.74365	2.05687	283.9189	3820.247	382.0247	26.6024	2.05687	315.3915
3872.033	387.2033	23.79295	2.05687	284.4525	3817.117	381.7117	26.65797	2.05687	316.0072
3871.444	387.1444	23.84897	2.05687	285.0823	3813.796	381.3796	26.71735	2.05687	316.5977
3870.459	387.0459	23.91217	2.05687	285.8094	3809.368	380.9368	26.77985	2.05687	317.2166
3869.32	386.9319	23.9749	2.05687	286.505	3803.783	380.3784	26.84015	2.05687	317.8505
3868.395	386.8395	24.02856	2.05687	287.0833	3797.11	379.711	26.89653	2.05687	318.4851
3867.814	386.7814	24.0791	2.05687	287.6239	3789.27	378.9269	26.95162	2.05687	319.1189
3867.594	386.7594	24.13671	2.05687	288.2565	3780.67	378.067	27.00876	2.05687	319.7275
3867.244	386.7244	24.20124	2.05687	289.0098	3771.056	377.1057	27.06861	2.05687	320.3195
3866.344	386.6344	24.26658	2.05687	289.814	3758.051	375.8051	27.12876	2.05687	320.946
3865.292	386.5292	24.33229	2.05687	290.5715	3740.103	374.0103	27.18653	2.05687	321.6279
3864.592	386.4592	24.39781	2.05687	291.2561	3719.494	371.9494	27.24272	2.05687	322.3002
3864.252	386.4252	24.4583	2.05687	291.8727	3698.409	369.8409	27.29944	2.05687	322.9172
3863.741	386.3741	24.51601	2.05687	292.4588	3674.843	367.4843	27.35644	2.05687	323.5471
3863.067	386.3067	24.57062	2.05687	293.0625	3646.459	364.6459	27.41398	2.05687	324.2405
3862.701	386.2701	24.61883	2.05687	293.6378	3615.611	361.5611	27.47153	2.05687	324.9323
3862.444	386.2444	24.66894	2.05687	294.1737	3587.415	358.7415	27.52883	2.05687	325.5364
3862.011	386.2011	24.72444	2.05687	294.7727	3562.056	356.2056	27.58913	2.05687	326.0762
3861.49	386.149	24.77751	2.05687	295.4424	3533.195	353.3195	27.65324	2.05687	326.6623
3860.945	386.0945	24.82721	2.05687	296.0424	3496.877	349.6877	27.71713	2.05687	327.3352
3860.441	386.0441	24.87764	2.05687	296.5635	3452.957	345.2957	27.77804	2.05687	328.061
3860.019	386.0019	24.92984	2.05687	297.1315	3406.12	340.612	27.83635	2.05687	328.7511
3859.706	385.9706	24.98271	2.05687	297.7456	3358.637	335.8637	27.89393	2.05687	329.3323
3859.374	385.9374	25.03779	2.05687	298.3302	3288.323	328.8323	27.95307	2.05687	329.9063
3858.703	385.8703	25.09876	2.05687	298.9084	3176.446	317.6446	28.01397	2.05687	330.5609
3857.843	385.7843	25.16448	2.05687	299.5405	3021.547	302.1547	28.07541	2.05687	331.2325
3857.043	385.7043	25.23123	2.05687	300.2399	2800.388	280.0388	28.13637	2.05687	331.876
3856.019	385.6019	25.29559	2.05687	300.9721	2518.079	251.8079	28.19662	2.05687	332.4503
3854.764	385.4764	25.35789	2.05687	301.7002	2149.264	214.9264	28.25855	2.05687	332.8962
3853.979	385.3979	25.41864	2.05687	302.3976	1606.964	160.6964	28.32497	2.05687	333.2151
3853.675	385.3675	25.4777	2.05687	303.0506	997.4092	99.74092	28.39354	2.05687	333.4639
3852.864	385.2864	25.53824	2.05687	303.6895	547.4263	54.74263	28.45457	2.05687	333.6922
3851.429	385.1429	25.60365	2.05687	304.355	306.2659	30.62659	28.50377	2.05687	333.9389
3849.95	384.9951	25.67402	2.05687	305.0826	195.2528	19.52528	28.552	2.05687	334.2979
3848.656	384.8656	25.74731	2.05687	305.866	147.5619	14.75619	28.60979	2.05687	334.8153
3847.832	384.7832	25.81404	2.05687	306.6003	127.789	12.7789	28.67774	2.05687	335.4382
3847.258	384.7258	25.86758	2.05687	307.2228	119.512	11.9512	28.75179	2.05687	336.1578
3845.873	384.5873	25.9194	2.05687	307.8374	115.8981	11.58981	28.8283	2.05687	336.9942
3843.864	384.3864	25.97195	2.05687	308.459	113.6524	11.36524	28.90552	2.05687	337.8869
3842.248	384.2248	26.01856	2.05687	309.0068	113.6524	11.36524	28.90552	2.05687	337.8869
3840.525	384.0525	26.06808	2.05687	309.5229	115.0494	11.50494	28.93848	2.05687	338.2349

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 0.7mm essai2

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
0.8633912	6.17E-02	6.04E-06	1.25E-02	0.7701797	1981.759	141.5643	1.78E-02	4.82E-02	8.328973
1.790512	0.1279028	2.00E-05	1.25E-02	0.8651797	1925.8	137.567	1.77E-02	4.80E-02	8.778855
24.25793	1.732833	8.82E-05	1.27E-02	1.542717	1875.193	133.9519	1.75E-02	4.76E-02	9.221894
47.96965	3.426648	2.18E-04	1.30E-02	1.854964	1847.679	131.9865	0.0175655	4.77E-02	9.60121
83.31577	5.951552	3.77E-04	1.33E-02	2.182007	1847.147	131.9485	1.80E-02	4.84E-02	9.901363
126.9966	9.071832	4.77E-04	1.35E-02	2.40683	1867.818	133.4251	1.86E-02	4.97E-02	10.14414
179.3605	12.81238	4.71E-04	1.35E-02	2.602013	1904.838	136.0696	1.94E-02	0.0513961	10.34084
238.822	17.05993	3.46E-04	1.32E-02	2.76197	1951.901	139.4315	2.04E-02	5.34E-02	10.50733
304.4105	21.74516	1.33E-04	1.28E-02	2.904751	2003.711	143.1324	2.15E-02	5.56E-02	10.65291
374.4345	26.74723	1.67E-04	1.22E-02	3.03444	2055.686	146.8452	0.022765	5.81E-02	10.78524
446.8629	31.92106	5.11E-04	1.15E-02	3.156713	2104.721	150.3479	2.41E-02	6.08E-02	10.90899
519.0054	37.07447	9.01E-04	1.07E-02	3.274089	2149.295	153.532	2.55E-02	6.36E-02	11.02742
588.8915	42.06668	1.28E-03	9.99E-03	3.388572	2189.13	156.3776	2.71E-02	6.67E-02	11.14253
655.4621	46.82207	1.66E-03	9.23E-03	3.501251	2224.63	158.9135	2.87E-02	7.00E-02	11.25562
719.0247	51.36258	1.99E-03	8.57E-03	3.612855	2256.542	161.1931	0.0304757	7.35E-02	11.36747
780.3113	55.7405	2.27E-03	8.00E-03	3.723808	2285.606	163.2692	3.23E-02	7.71E-02	11.47858
840.2621	60.02301	2.48E-03	7.58E-03	3.834373	2312.467	165.188	3.42E-02	8.09E-02	11.58923
899.4433	64.25054	2.60E-03	7.35E-03	3.944706	2337.533	166.9786	3.61E-02	8.47E-02	11.69962
958.2492	68.45126	2.61E-03	7.33E-03	4.054903	2361.123	168.6637	3.81E-02	8.87E-02	11.80985
1016.793	72.63326	2.51E-03	7.52E-03	4.165018	2383.409	170.2557	4.00E-02	9.26E-02	11.91999
1075.146	76.80162	2.33E-03	7.88E-03	4.275085	2404.537	171.7649	4.20E-02	9.66E-02	12.03007
1133.201	80.94871	2.09E-03	8.37E-03	4.385125	2424.498	173.1908	4.40E-02	0.1006428	12.14011
1190.738	85.05882	1.77E-03	9.01E-03	4.495148	2443.371	174.539	4.61E-02	0.1047403	12.25014
1247.323	89.10086	1.39E-03	9.76E-03	4.605161	2461.151	175.809	4.82E-02	0.1089321	12.36016
1302.046	93.0099	9.51E-04	1.06E-02	4.715169	2477.941	177.0085	0.0503373	0.1132195	12.47017
1353.471	96.68339	4.95E-04	1.16E-02	4.825173	2493.715	178.1352	5.25E-02	0.1175464	12.58017
1399.846	99.99613	2.01E-05	1.25E-02	4.935176	2508.475	179.1896	0.054654	0.1218529	12.69022
1440.028	102.8665	4.25E-04	1.34E-02	5.045177	2522.162	180.1673	5.68E-02	0.1260966	12.80027
1473.811	105.2797	8.51E-04	1.42E-02	5.155179	2534.802	181.0702	5.89E-02	0.1302746	12.91035
1501.637	107.2674	1.21E-03	1.50E-02	5.265179	2546.416	181.8999	6.09E-02	0.1343908	13.02036
1523.975	108.8632	1.52E-03	1.56E-02	5.392779	2557.065	182.6606	6.29E-02	0.1384224	13.13034
1541.358	110.1049	1.80E-03	1.61E-02	5.54502	2566.841	183.3589	6.49E-02	0.1423283	13.24029
1554.87	111.07	2.08E-03	1.67E-02	5.731051	2575.852	184.0025	6.68E-02	0.1460907	13.35026
1565.843	111.8539	2.33E-03	1.72E-02	5.920463	2584.2	184.5989	6.86E-02	0.1497066	13.46027
1575.563	112.5483	2.57E-03	1.77E-02	6.103116	2591.909	185.1496	7.03E-02	0.1532204	13.57031
1585.949	113.2902	2.81E-03	1.82E-02	6.262993	2599.039	185.6589	7.20E-02	0.1566333	13.68038
1600.026	114.2957	3.13E-03	1.88E-02	6.409704	2605.717	186.1359	7.37E-02	0.1599759	13.79037
1621.205	115.8087	3.58E-03	1.97E-02	6.543356	2612.033	186.5871	7.54E-02	0.1632585	13.90035
1650.866	117.9274	4.21E-03	2.10E-02	6.669137	2618.039	187.0162	7.70E-02	0.1664733	14.0103
1687.875	120.5711	5.03E-03	2.26E-02	6.789032	2623.715	187.4216	7.86E-02	0.1696701	14.12027
1729.716	123.56	6.02E-03	2.46E-02	6.90531	2629.106	187.8067	8.01E-02	0.1728029	14.23024
1774.01	126.7241	7.17E-03	2.69E-02	7.019175	2634.272	188.1757	8.17E-02	0.175958	14.34022
1819.193	129.9516	8.48E-03	2.95E-02	7.131558	2639.22	188.5292	8.33E-02	0.1790698	14.4502
1864.027	133.1543	9.93E-03	3.24E-02	7.243004	2643.952	188.8672	0.0848358	0.1822165	14.56019
1907.789	136.2804	1.15E-02	3.55E-02	7.353881	2648.425	189.1868	8.64E-02	0.1853591	14.67019
1949.883	139.2873	1.31E-02	0.0387271	7.464407	2652.685	189.491	8.80E-02	0.1885395	14.78019
1990.06	142.1573	1.48E-02	4.21E-02	7.574722	2656.793	189.7845	0.0896011	0.1917471	14.89018
2017.248	144.0994	1.63E-02	4.52E-02	7.722429	2660.86	190.075	9.12E-02	0.1949929	15.00018
2017.41	144.111	1.74E-02	4.74E-02	7.962069	2664.952	190.3673	9.29E-02	0.1983118	15.11018

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
4290.899	306.5147	18.74187	2.070043	252.0181	4285.173	306.1057	21.45468	2.070043	284.8625
4290.684	306.4993	18.80106	2.070043	252.7299	4284.476	306.0558	21.5038	2.070043	285.4549
4290.537	306.4888	18.85902	2.070043	253.465	4283.71	306.0012	21.55561	2.070043	286.0626
4290.42	306.4805	18.91434	2.070043	254.1932	4283.042	305.9534	21.6115	2.070043	286.6902
4290.417	306.4802	18.96515	2.070043	254.8468	4282.455	305.9115	21.66839	2.070043	287.3508
4290.467	306.4839	19.01507	2.070043	255.4526	4282	305.879	21.72482	2.070043	288.0149
4290.596	306.493	19.06469	2.070043	256.0184	4281.672	305.8556	21.7795	2.070043	288.6703
4290.714	306.5015	19.11643	2.070043	256.6255	4281.204	305.8221	21.8359	2.070043	289.3223
4290.875	306.513	19.16865	2.070043	257.2524	4280.539	305.7746	21.89531	2.070043	290.01
4290.982	306.5206	19.22248	2.070043	257.9185	4279.56	305.7047	21.9585	2.070043	290.7357
4291.172	306.5342	19.27537	2.070043	258.5684	4278.509	305.6296	22.02356	2.070043	291.501
4291.314	306.5444	19.32737	2.070043	259.2116	4277.338	305.546	22.0892	2.070043	292.2864
4291.5	306.5576	19.37764	2.070043	259.8224	4276.104	305.4579	22.15479	2.070043	293.0875
4291.598	306.5646	19.42764	2.070043	260.4153	4274.904	305.3721	22.219	2.070043	293.8777
4291.724	306.5736	19.477	2.070043	260.984	4273.812	305.2941	22.28201	2.070043	294.6373
4291.873	306.5842	19.52443	2.070043	261.5307	4272.801	305.2219	22.3438	2.070043	295.3677
4292.05	306.5969	19.57259	2.070043	262.087	4271.575	305.1343	22.40625	2.070043	296.0867
4292.183	306.6064	19.62304	2.070043	262.6836	4269.978	305.0202	22.46979	2.070043	296.8176
4292.156	306.6045	19.6784	2.070043	263.3532	4267.616	304.8515	22.53544	2.070043	297.5704
4291.977	306.5917	19.73597	2.070043	264.0553	4264.56	304.6332	22.59996	2.070043	298.3295
4291.674	306.57	19.79462	2.070043	264.7601	4260.462	304.3405	22.66241	2.070043	299.0787
4291.433	306.5528	19.8529	2.070043	265.4328	4255.185	303.9635	22.72078	2.070043	299.791
4291.279	306.5418	19.91116	2.070043	266.1125	4247.175	303.3913	22.7801	2.070043	300.5167
4291.24	306.5391	19.96888	2.070043	266.8016	4236.632	302.6382	22.83886	2.070043	301.237
4291.201	306.5363	20.02603	2.070043	267.5062	4223.405	301.6934	22.89724	2.070043	301.9634
4291.195	306.5359	20.08284	2.070043	268.2012	4208.567	300.6335	22.95158	2.070043	302.6402
4291.121	306.5305	20.1407	2.070043	268.8904	4190.604	299.3502	23.00595	2.070043	303.3145
4291.02	306.5233	20.20048	2.070043	269.5875	4168.512	297.7721	23.06244	2.070043	304.0072
4290.736	306.5031	20.26246	2.070043	270.3012	4141.312	295.8291	23.12316	2.070043	304.7518
4290.438	306.4817	20.32471	2.070043	271.0232	4109.105	293.5285	23.18682	2.070043	305.5436
4290.116	306.4588	20.38607	2.070043	271.7386	4072.947	290.9456	23.25211	2.070043	306.3584
4289.984	306.4493	20.44595	2.070043	272.4285	4034.819	288.222	23.31704	2.070043	307.1615
4289.877	306.4417	20.50661	2.070043	273.1198	3995.769	285.4325	23.38066	2.070043	307.9205
4289.763	306.4335	20.56815	2.070043	273.8336	3954.293	282.4697	23.44269	2.070043	308.6386
4289.558	306.4189	20.62952	2.070043	274.5879	3906.167	279.0319	23.50457	2.070043	309.3442
4289.286	306.3995	20.68855	2.070043	275.3474	3846.766	274.7887	23.56663	2.070043	310.0551
4289.011	306.3799	20.74471	2.070043	276.0887	3771.11	269.3842	23.62959	2.070043	310.7795
4288.633	306.3528	20.79963	2.070043	276.8053	3664.534	261.7711	23.69503	2.070043	311.5302
4288.266	306.3266	20.85469	2.070043	277.523	3528.827	252.0771	23.76123	2.070043	312.2794
4287.868	306.2982	20.91121	2.070043	278.2315	3358.41	239.9036	23.82802	2.070043	313.0121
4287.528	306.2739	20.96885	2.070043	278.9284	3172.215	226.603	23.89011	2.070043	313.6607
4287.259	306.2547	21.02775	2.070043	279.5985	2914.728	208.2097	23.95231	2.070043	314.2463
4286.953	306.2328	21.08763	2.070043	280.2827	2563.594	183.1269	24.01482	2.070043	314.7471
4286.692	306.2142	21.14768	2.070043	280.9928	2095.607	149.6969	24.0828	2.070043	315.2038
4286.326	306.188	21.20689	2.070043	281.7231	1517.552	108.4043	24.15417	2.070043	315.5904
4286.142	306.1749	21.26239	2.070043	282.4336	1013.733	72.41467	24.22556	2.070043	315.9705
4286.027	306.1667	21.31441	2.070043	283.0813	211.4825	15.10697	24.30284	2.070043	316.2902
4285.979	306.1632	21.36178	2.070043	283.6875	200.0526	14.2905	24.36451	2.070043	316.7302
4285.724	306.145	21.40849	2.070043	284.2663	200.0249	14.28852	24.43731	2.070043	317.4502

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 0.7mm essai2 transversal au sens de laminage

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
-0.255218	-1.82E-02	-4.20E-05	6.92E-03	0.1899453	1858.207	132.7385	4.49E-02	9.68E-02	9.181911
-0.255218	-1.82E-02	-4.20E-05	6.92E-03	0.1899453	1843.342	131.6767	4.52E-02	9.74E-02	9.594431
5.141759	0.3672947	1.65E-04	7.34E-03	0.9956941	1850.01	132.153	4.58E-02	0.0986768	9.943845
12.38156	0.88446	4.26E-04	7.86E-03	1.40521	1872.537	133.7622	4.67E-02	0.1004819	10.22376
25.46272	1.818895	8.31E-04	8.67E-03	1.834961	1907.222	136.2399	4.80E-02	0.1029298	10.45124
45.27858	3.234415	1.28E-03	9.57E-03	2.139707	1947.815	139.1396	4.95E-02	0.1060786	10.63814
72.92139	5.209043	1.64E-03	1.03E-02	2.390204	1990.104	142.1605	0.0514561	0.1099178	10.79803
112.6041	8.043728	1.69E-03	1.04E-02	2.595951	2031.167	145.0938	5.37E-02	0.1144481	10.93947
165.5973	11.82922	1.34E-03	9.69E-03	2.780059	2069.797	147.8532	5.63E-02	0.1195534	11.06916
233.8467	16.70453	6.53E-04	8.31E-03	2.955342	2105.703	150.4181	5.91E-02	0.1251449	11.19129
309.1023	22.08031	-1.34E-04	6.74E-03	3.117654	2139.156	152.8078	6.21E-02	0.1311245	11.30871
387.4375	27.67609	-8.40E-04	5.33E-03	3.268522	2170.497	155.0466	6.52E-02	0.1374285	11.42322
462.3542	33.02766	-1.33E-03	4.35E-03	3.405115	2200.083	157.16	6.85E-02	0.1439939	11.53593
533.7369	38.12679	-1.57E-03	3.87E-03	3.533668	2228.079	159.1599	7.19E-02	0.1507771	11.64756
600.115	42.86842	-1.53E-03	3.95E-03	3.655301	2254.709	161.0622	0.0753706	0.1577468	11.75854
662.5954	47.33162	-1.25E-03	4.51E-03	3.772871	2280.051	162.8724	7.89E-02	0.1648828	11.86911
722.1598	51.58653	-7.90E-04	5.43E-03	3.887539	2304.204	164.5977	8.26E-02	0.1721819	11.97946
779.9021	55.71127	-2.23E-04	6.56E-03	4.000459	2327.081	166.2319	8.63E-02	0.1796376	12.08966
836.5226	59.75589	4.36E-04	7.88E-03	4.112236	2348.684	167.7752	0.0901295	0.1872646	12.19978
892.4722	63.75257	1.17E-03	9.36E-03	4.223322	2368.936	169.2218	9.40E-02	0.1950655	12.30985
947.9883	67.71828	1.99E-03	1.10E-02	4.333976	2387.936	170.579	9.80E-02	0.2030548	12.41989
1003.156	71.65911	2.89E-03	1.28E-02	4.444369	2405.689	171.8472	0.1021084	0.2111224	12.52991
1057.95	75.57327	3.88E-03	1.48E-02	4.554604	2422.336	173.0364	0.1062816	0.2195688	12.63993
1112.314	79.45671	5.01E-03	1.70E-02	4.664744	2437.828	174.143	0.1105527	0.228111	12.74993
1166.176	83.30426	6.28E-03	1.96E-02	4.774827	2452.196	175.1694	0.1149333	0.2368721	12.85994
1219.353	87.10285	7.70E-03	2.24E-02	4.884876	2465.367	176.1102	0.1194271	0.2458598	12.96994
1271.44	90.82361	9.22E-03	2.55E-02	4.994905	2477.389	176.969	0.124022	0.2550496	13.07994
1321.607	94.40728	1.08E-02	0.0286342	5.104921	2488.271	177.7463	0.1287138	0.2644332	13.18994
1368.8	97.77842	1.24E-02	3.19E-02	5.214931	2498.066	178.4461	0.1335032	0.2740119	13.29994
1411.594	100.8353	1.40E-02	3.50E-02	5.324937	2506.787	179.069	0.1383934	0.2837924	13.40995
1448.1	103.4431	1.55E-02	3.80E-02	5.472341	2514.48	179.6185	0.1433863	0.2937781	13.51995
1477.519	105.5446	1.68E-02	4.07E-02	5.672102	2521.154	180.0953	0.1484779	0.3039614	13.62994
1501.214	107.2372	1.81E-02	4.32E-02	5.943672	2526.889	180.5049	0.1536694	0.3143444	13.73995
1523.836	108.8532	1.93E-02	4.56E-02	6.222421	2531.712	180.8495	0.1589572	0.32492	13.84995
1549.777	110.7063	2.06E-02	4.82E-02	6.486809	2535.761	181.1387	0.1643374	0.3356804	13.95994
1581.51	112.973	2.20E-02	5.10E-02	6.702798	2539.122	181.3788	0.1702749	0.3475553	14.07874
1618.248	115.5974	2.36E-02	5.43E-02	6.89081	2541.94	181.5801	0.177185	0.3613756	14.21426
1658.162	118.4486	2.55E-02	5.80E-02	7.05107	2544.303	181.7489	0.1856369	0.3782794	14.37724
1699.301	121.3873	2.75E-02	6.21E-02	7.194603	2546.333	181.894	0.1950257	0.3970569	14.55651
1740.223	124.3105	2.97E-02	6.65E-02	7.32563	2548.116	182.0213	0.204784	0.4165735	14.7417
1779.78	127.1362	3.20E-02	7.11E-02	7.448971	2549.766	182.1391	0.214394	0.4357935	14.92346
1816.886	129.7868	3.44E-02	7.57E-02	7.567184	2551.343	182.2518	0.224161	0.4553275	15.10796
1850.285	132.1726	3.66E-02	8.03E-02	7.682249	2552.954	182.3669	0.2345479	0.4761015	15.30441
1878.841	134.2125	3.88E-02	8.45E-02	7.795323	2554.583	182.4833	0.2452047	0.4974149	15.50667
1901.938	135.8624	4.07E-02	8.83E-02	7.907186	2556.28	182.6045	0.255917	0.5188395	15.71106
1919.878	137.1439	4.23E-02	0.0916355	8.018304	2557.998	182.7272	0.2661928	0.5393911	15.90853
1924.541	137.477	4.35E-02	9.41E-02	8.168573	2559.759	182.853	0.2762406	0.5594867	16.10307
1913.47	136.6862	4.43E-02	9.57E-02	8.404811	2561.549	182.9809	0.2859973	0.5790002	16.29353
1884.904	134.6456	4.47E-02	0.096329	8.760039	2563.406	183.1135	0.2955609	0.5981274	16.48177

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
3964.565	283.2035	19.77867	2.009657	263.213	3930.954	280.8025	22.60785	2.009657	297.6049
3964.377	283.1901	19.82896	2.009657	263.8344	3929.501	280.6987	22.66795	2.009657	298.3605
3964.181	283.176	19.87951	2.009657	264.4626	3928.079	280.5971	22.72762	2.009657	299.1006
3963.869	283.1537	19.93144	2.009657	265.1042	3926.685	280.4976	22.78562	2.009657	299.8038
3963.521	283.1289	19.98433	2.009657	265.7449	3924.97	280.3751	22.84384	2.009657	300.5033
3963.053	283.0954	20.03786	2.009657	266.3859	3922.974	280.2324	22.90294	2.009657	301.2196
3962.613	283.064	20.09068	2.009657	267.0143	3920.63	280.065	22.96457	2.009657	301.9867
3962.055	283.0242	20.14498	2.009657	267.6614	3918.066	279.8819	23.02794	2.009657	302.7885
3961.504	282.9848	20.20211	2.009657	268.3314	3915.335	279.6867	23.09195	2.009657	303.5927
3960.976	282.9471	20.26353	2.009657	269.0557	3912.511	279.4851	23.15496	2.009657	304.3682
3960.591	282.9196	20.32543	2.009657	269.7935	3909.735	279.2868	23.21619	2.009657	305.0909
3960.314	282.8998	20.38558	2.009657	270.5404	3906.735	279.0724	23.27665	2.009657	305.8047
3960.052	282.881	20.44076	2.009657	271.2401	3903.571	278.8464	23.33462	2.009657	306.4894
3959.705	282.8563	20.49421	2.009657	271.9275	3899.974	278.5895	23.39209	2.009657	307.1801
3959.281	282.826	20.54635	2.009657	272.5806	3896.137	278.3154	23.44812	2.009657	307.8324
3958.827	282.7935	20.60077	2.009657	273.2477	3891.433	277.9793	23.50831	2.009657	308.5116
3958.428	282.7651	20.65767	2.009657	273.9219	3885.459	277.5526	23.57122	2.009657	309.2083
3958.023	282.7361	20.7185	2.009657	274.649	3877.428	276.9789	23.63766	2.009657	309.9531
3957.664	282.7105	20.78209	2.009657	275.4154	3866.609	276.2061	23.70389	2.009657	310.7228
3957.268	282.6822	20.84714	2.009657	276.2265	3853.536	275.2723	23.76707	2.009657	311.4843
3956.861	282.6531	20.91409	2.009657	277.0541	3838.472	274.1962	23.82508	2.009657	312.2183
3956.291	282.6124	20.98119	2.009657	277.908	3823.386	273.1186	23.87638	2.009657	312.8707
3955.588	282.5622	21.048	2.009657	278.7511	3807.029	271.9501	23.92571	2.009657	313.4868
3954.75	282.5023	21.11085	2.009657	279.5721	3789.414	270.6918	23.97581	2.009657	314.0725
3953.908	282.4422	21.171	2.009657	280.3314	3768.225	269.1782	24.03057	2.009657	314.6956
3953.089	282.3837	21.22836	2.009657	281.0601	3743.647	267.4225	24.08869	2.009657	315.3488
3952.339	282.3301	21.28515	2.009657	281.7543	3715.098	265.3831	24.14936	2.009657	316.0466
3951.638	282.28	21.34107	2.009657	282.4384	3682.431	263.0496	24.21057	2.009657	316.7824
3951.033	282.2368	21.39661	2.009657	283.0954	3646.713	260.4981	24.27161	2.009657	317.5346
3950.524	282.2004	21.45194	2.009657	283.7618	3608.651	257.7792	24.33208	2.009657	318.278
3950.062	282.1674	21.50744	2.009657	284.4266	3567.738	254.8566	24.39265	2.009657	318.986
3949.596	282.1342	21.56311	2.009657	285.0945	3523.971	251.7302	24.45142	2.009657	319.6496
3949.042	282.0946	21.61932	2.009657	285.7436	3473.483	248.1237	24.50821	2.009657	320.2805
3948.428	282.0507	21.67679	2.009657	286.3926	3413.677	243.8515	24.56129	2.009657	320.8658
3947.679	281.9972	21.73509	2.009657	287.0633	3324.458	237.4783	24.61571	2.009657	321.4547
3946.927	281.9435	21.79325	2.009657	287.7418	3184.958	227.5133	24.67245	2.009657	322.0571
3946.129	281.8865	21.85006	2.009657	288.4297	2976.51	212.623	24.73398	2.009657	322.6976
3945.358	281.8314	21.90745	2.009657	289.0983	2673.794	190.9989	24.79878	2.009657	323.3268
3944.454	281.7668	21.96643	2.009657	289.7809	2276.023	162.5847	24.86688	2.009657	323.9045
3943.559	281.7029	22.02658	2.009657	290.4545	1799.398	128.5376	24.93569	2.009657	324.3989
3942.614	281.6354	22.08555	2.009657	291.1241	1327.855	94.85357	24.99926	2.009657	324.8035
3941.766	281.5748	22.1421	2.009657	291.7686	926.4935	66.18284	25.05514	2.009657	325.1358
3940.777	281.5042	22.19767	2.009657	292.4261	632.225	45.16216	25.10398	2.009657	325.4441
3939.729	281.4293	22.25446	2.009657	293.1134	429.183	30.65812	25.15342	2.009657	325.7962
3938.438	281.3371	22.31268	2.009657	293.8592	285.6503	20.40505	25.20253	2.009657	326.2002
3937.055	281.2383	22.3721	2.009657	294.6215	191.9018	13.70825	25.2608	2.009657	326.7431
3935.546	281.1305	22.43002	2.009657	295.3887	58.53233	4.18118	25.3014	2.009657	327.075
3934.035	281.0226	22.48856	2.009657	296.1226	58.83997	4.203156	25.38959	2.009657	328.028
3932.509	280.9135	22.54719	2.009657	296.8588	60.24401	4.303452	25.45301	2.009657	328.765

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 1mm essai2

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
-1.476431	-7.38E-02	1.98E-06	-2.48E-02	0.3656719	1890.673	94.53366	2.10E-02	0.0172177	8.399672
-1.476431	-7.38E-02	1.98E-06	-2.48E-02	0.3656719	1917.578	95.87888	2.12E-02	1.77E-02	8.509671
1.291207	6.46E-02	1.58E-06	-2.48E-02	1.212534	1943.395	97.16973	2.15E-02	1.82E-02	8.619672
4.513911	0.2256955	4.04E-06	-2.48E-02	1.721127	1967.458	98.37292	2.16E-02	1.85E-02	8.729671
9.876282	0.4938141	1.91E-05	-2.47E-02	2.277205	1989.828	99.49141	2.18E-02	1.89E-02	8.841871
18.46859	0.9234293	7.55E-05	-2.46E-02	2.68846	2012.542	100.6271	2.20E-02	1.92E-02	8.957151
31.11279	1.55564	1.75E-04	-2.44E-02	3.030068	2039.903	101.9951	2.23E-02	1.98E-02	9.076655
47.84879	2.392439	2.89E-04	-2.42E-02	3.289533	2076.536	103.8268	2.26E-02	2.04E-02	9.196582
67.15897	3.357949	3.86E-04	-2.40E-02	3.509555	2124.783	106.2391	2.30E-02	2.13E-02	9.315664
87.97536	4.398768	4.89E-04	-2.38E-02	3.704392	2183.812	109.1906	2.35E-02	2.23E-02	9.431898
108.8708	5.44354	6.62E-04	-2.34E-02	3.893113	2250.252	112.5126	2.41E-02	0.0233511	9.546488
128.9739	6.448695	9.46E-04	-2.29E-02	4.067962	2308.829	115.4415	2.45E-02	2.42E-02	9.699044
147.5808	7.379042	1.37E-03	-2.20E-02	4.229854	2344.55	117.2275	0.0246973	2.46E-02	9.945657
166.9211	8.346052	1.95E-03	-2.09E-02	4.374265	2347.164	117.3582	2.46E-02	2.45E-02	10.32301
190.4564	9.522818	2.66E-03	-1.94E-02	4.508374	2333.118	116.6559	2.44E-02	2.40E-02	10.78354
221.4013	11.07007	3.47E-03	-1.78E-02	4.63366	2322.699	116.135	2.43E-02	2.37E-02	11.23617
260.2557	13.01278	4.31E-03	-1.62E-02	4.753625	2332.323	116.6161	2.43E-02	0.0238271	11.62215
305.7849	15.28925	5.13E-03	-1.45E-02	4.869809	2362.871	118.1435	0.0245637	2.44E-02	11.92716
356.1201	17.806	5.92E-03	-1.29E-02	4.983683	2410.427	120.5213	2.50E-02	2.52E-02	12.17309
409.7112	20.48556	6.65E-03	-1.15E-02	5.09605	2470.419	123.521	2.56E-02	2.64E-02	12.37187
465.4737	23.27368	7.35E-03	-1.01E-02	5.207498	2538.448	126.9224	0.0261905	2.76E-02	12.53968
522.7348	26.13674	8.02E-03	-8.73E-03	5.318372	2611.318	130.5659	2.68E-02	2.89E-02	12.6861
581.077	29.05385	8.68E-03	-7.41E-03	5.428899	2687.2	134.36	2.75E-02	3.01E-02	12.81893
640.333	32.01665	9.33E-03	-6.12E-03	5.539213	2765.403	138.2702	0.0280701	3.14E-02	12.94304
700.4021	35.0201	9.97E-03	-4.83E-03	5.649401	2845.998	142.2999	0.0286885	3.26E-02	13.06172
761.346	38.0673	1.06E-02	-3.55E-03	5.759512	2929.043	146.4522	2.93E-02	3.38E-02	13.17703
823.088	41.1544	1.13E-02	-2.27E-03	5.869578	3014.63	150.7315	0.0299083	3.50E-02	13.29019
885.6328	44.28164	1.19E-02	-9.88E-04	5.979617	3102.663	155.1331	3.05E-02	3.63E-02	13.40207
948.8256	47.44128	1.25E-02	2.86E-04	6.08964	3193.183	159.6592	3.11E-02	0.0374579	13.51315
1012.679	50.63396	1.32E-02	1.55E-03	6.199653	3286.065	164.3033	3.17E-02	3.87E-02	13.62379
1077.15	53.85749	1.38E-02	2.80E-03	6.309661	3381.111	169.0555	3.23E-02	3.99E-02	13.73416
1142.364	57.11821	0.0144085	4.05E-03	6.419666	3477.932	173.8966	3.29E-02	4.11E-02	13.84437
1208.394	60.41972	1.50E-02	5.28E-03	6.529668	3576.273	178.8137	3.36E-02	4.24E-02	13.9545
1275.113	63.75567	1.56E-02	6.52E-03	6.63967	3675.964	183.7982	3.42E-02	4.37E-02	14.06457
1341.614	67.0807	1.62E-02	7.73E-03	6.749671	3776.999	188.85	3.49E-02	4.50E-02	14.17461
1406.111	70.30556	0.0168329	8.90E-03	6.859671	3879.342	193.9671	3.56E-02	4.63E-02	14.28464
1466.42	73.32102	1.74E-02	9.96E-03	6.969672	3982.989	199.1494	3.63E-02	4.77E-02	14.39465
1520.781	76.03904	1.78E-02	1.09E-02	7.079672	4087.866	204.3933	3.70E-02	4.92E-02	14.50466
1568.358	78.41791	1.82E-02	1.17E-02	7.189672	4193.978	209.6989	3.77E-02	5.06E-02	14.61467
1609.326	80.4663	1.86E-02	1.24E-02	7.299672	4301.339	215.0669	3.85E-02	5.21E-02	14.72467
1644.525	82.22627	1.89E-02	1.30E-02	7.409672	4409.942	220.4971	0.039246	5.37E-02	14.83467
1675.289	83.76447	1.92E-02	1.36E-02	7.519672	4519.607	225.9804	0.0400242	5.53E-02	14.94467
1703.057	85.15282	1.94E-02	1.41E-02	7.629672	4630.166	231.5083	4.08E-02	5.68E-02	15.05467
1729.347	86.46735	1.96E-02	1.45E-02	7.739672	4741.421	237.071	4.16E-02	5.84E-02	15.16467
1755.268	87.76341	0.0198429	1.49E-02	7.849672	4855.829	242.7914	4.24E-02	6.00E-02	15.27703
1781.543	89.07716	2.01E-02	1.54E-02	7.959672	4974.124	248.7062	4.32E-02	6.17E-02	15.39254
1808.362	90.41808	2.03E-02	0.0158466	8.069672	5097.71	254.8855	4.41E-02	6.35E-02	15.51235
1835.681	91.78404	0.0205351	1.63E-02	8.179671	5222.216	261.1108	0.04499	6.52E-02	15.6323
1863.232	93.1616	2.08E-02	1.67E-02	8.289672	5346.513	267.3256	4.58E-02	6.68E-02	15.75132

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
8536.107	426.8054	20.07435	2.072047	304.9417	8525.865	426.2933	22.39779	2.072047	334.9288
8536.104	426.8052	20.13051	2.072047	305.6461	8525.358	426.2679	22.43522	2.072047	335.4448
8536.101	426.805	20.18497	2.072047	306.3105	8524.776	426.2388	22.47398	2.072047	335.9737
8536.17	426.8085	20.23477	2.072047	306.925	8524.243	426.2122	22.51397	2.072047	336.4649
8536.232	426.8116	20.2808	2.072047	307.5221	8523.693	426.1847	22.55551	2.072047	336.9802
8536.271	426.8135	20.32229	2.072047	308.0966	8523.247	426.1624	22.59656	2.072047	337.4894
8536.219	426.8109	20.3642	2.072047	308.6945	8522.661	426.1331	22.63892	2.072047	338.0514
8536.149	426.8075	20.40768	2.072047	309.2947	8521.979	426.0989	22.6835	2.072047	338.6406
8536.117	426.8058	20.45514	2.072047	309.9089	8521.108	426.0554	22.73165	2.072047	339.2637
8536.167	426.8083	20.50447	2.072047	310.5485	8520.227	426.0113	22.78181	2.072047	339.9127
8536.367	426.8184	20.55516	2.072047	311.2088	8519.28	425.964	22.83318	2.072047	340.5646
8536.6	426.83	20.60702	2.072047	311.905	8518.278	425.9139	22.88459	2.072047	341.2298
8536.807	426.8403	20.66187	2.072047	312.6006	8517.166	425.8583	22.93775	2.072047	341.8781
8536.842	426.8421	20.718	2.072047	313.3041	8515.942	425.7971	22.99235	2.072047	342.5605
8536.756	426.8378	20.77444	2.072047	313.987	8514.647	425.7324	23.04972	2.072047	343.2716
8536.654	426.8327	20.82613	2.072047	314.6257	8513.255	425.6628	23.10849	2.072047	344.0446
8536.512	426.8256	20.87533	2.072047	315.2189	8511.858	425.5929	23.16914	2.072047	344.8352
8536.425	426.8212	20.91892	2.072047	315.7618	8510.379	425.519	23.22964	2.072047	345.6358
8536.252	426.8126	20.96206	2.072047	316.2924	8508.824	425.4412	23.29058	2.072047	346.4076
8536.055	426.8027	21.00323	2.072047	316.8165	8507.172	425.3586	23.34973	2.072047	347.1522
8535.731	426.7866	21.04615	2.072047	317.3547	8505.496	425.2748	23.40689	2.072047	347.8522
8535.414	426.7707	21.08814	2.072047	317.9187	8503.878	425.1939	23.4587	2.072047	348.5199
8535.262	426.7631	21.12955	2.072047	318.4926	8502.214	425.1107	23.50756	2.072047	349.1598
8535.312	426.7656	21.17132	2.072047	319.0766	8500.479	425.024	23.55389	2.072047	349.8013
8535.466	426.7733	21.21557	2.072047	319.6526	8498.653	424.9327	23.60174	2.072047	350.4312
8535.467	426.7733	21.26351	2.072047	320.2382	8496.676	424.8338	23.65106	2.072047	351.0849
8535.29	426.7645	21.31345	2.072047	320.8521	8494.602	424.7301	23.70095	2.072047	351.725
8534.968	426.7484	21.36411	2.072047	321.4875	8492.36	424.618	23.74972	2.072047	352.3669
8534.701	426.735	21.41434	2.072047	322.1437	8490.206	424.5103	23.79518	2.072047	352.9438
8534.365	426.7183	21.46518	2.072047	322.811	8487.879	424.394	23.83947	2.072047	353.5109
8533.969	426.6984	21.51673	2.072047	323.4939	8485.377	424.2689	23.88286	2.072047	354.0576
8533.35	426.6675	21.56936	2.072047	324.178	8482.403	424.1202	23.92774	2.072047	354.6397
8532.793	426.6396	21.62073	2.072047	324.8203	8479.094	423.9547	23.97473	2.072047	355.2209
8532.256	426.6128	21.67095	2.072047	325.4291	8475.219	423.7609	24.02488	2.072047	355.8407
8531.908	426.5954	21.71938	2.072047	326.0242	8470.438	423.5219	24.07778	2.072047	356.4978
8531.536	426.5768	21.76943	2.072047	326.6601	8464.656	423.2328	24.13191	2.072047	357.189
8531.255	426.5627	21.82232	2.072047	327.3513	8457.447	422.8724	24.18615	2.072047	357.8888
8531.002	426.5501	21.87733	2.072047	328.062	8448.223	422.4111	24.24121	2.072047	358.58
8530.941	426.5471	21.93048	2.072047	328.7426	8434.805	421.7402	24.29759	2.072047	359.3018
8530.886	426.5443	21.97792	2.072047	329.3351	8415.648	420.7824	24.35634	2.072047	360.055
8530.765	426.5382	22.02114	2.072047	329.88	8390.863	419.5432	24.41527	2.072047	360.821
8530.401	426.5201	22.06232	2.072047	330.4001	8360.987	418.0494	24.47427	2.072047	361.5551
8529.91	426.4955	22.10402	2.072047	330.9585	8325.858	416.2929	24.53192	2.072047	362.2488
8529.314	426.4657	22.14621	2.072047	331.5306	8281.575	414.0788	24.58919	2.072047	362.9456
8528.625	426.4312	22.1898	2.072047	332.1413	8231.12	411.556	24.64568	2.072047	363.6478
8527.937	426.3968	22.23368	2.072047	332.7372	8166.534	408.3267	24.70083	2.072047	364.4218
8527.296	426.3648	22.27736	2.072047	333.3142	8122.714	406.1357	24.75825	2.072047	365.0747
8526.806	426.3403	22.31904	2.072047	333.8594	8018.901	400.9451	24.80864	2.072047	366.0647
8526.345	426.3172	22.35928	2.072047	334.3869	7994.738	399.7369	24.86006	2.072047	366.2847

ANNEXE I

Essais de traction:

Tôle d'épaisseur 1mm essai 2 au transversal

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
0.1737118	8.69E-03	2.00E-06	-2.48E-02	0.020021	2274.434	113.7217	3.25E-02	4.02E-02	11.87288
0.1648903	8.24E-03	-2.00E-06	-2.48E-02	0.115021	2305.706	115.2853	3.29E-02	4.10E-02	12.0951
1.323469	6.62E-02	4.19E-06	-2.48E-02	1.305477	2346.558	117.3279	3.34E-02	4.19E-02	12.2877
2.170791	0.1085396	7.87E-06	-2.48E-02	2.087979	2395.784	119.7892	3.39E-02	4.30E-02	12.45092
3.212676	0.1606338	1.47E-05	-0.0248032	2.997568	2449.323	122.4662	3.46E-02	0.044296	12.59642
4.635267	0.2317633	3.42E-05	-2.48E-02	3.766468	2502.362	125.1181	3.52E-02	4.55E-02	12.72869
6.720238	0.3360119	7.59E-05	-2.47E-02	4.465822	2550.351	127.5175	0.0357347	4.66E-02	12.85281
10.16372	0.508186	1.62E-04	-2.45E-02	5.03566	2591.988	129.5994	3.62E-02	0.0475456	12.97151
15.52753	0.7763764	2.86E-04	-0.0242606	5.512427	2627.054	131.3527	3.66E-02	4.83E-02	13.08687
24.23368	1.211684	4.45E-04	-2.39E-02	5.880212	2644.08	132.204	3.68E-02	4.87E-02	13.23973
37.08864	1.854432	6.28E-04	-2.36E-02	6.17304	2639.262	131.9631	3.68E-02	4.87E-02	13.48634
53.69248	2.684624	8.42E-04	-2.31E-02	6.400679	2610.787	130.5394	0.036536	4.82E-02	13.86364
74.02118	3.701059	1.26E-03	-2.23E-02	6.60638	2585.487	129.2744	3.63E-02	4.78E-02	14.32409
99.30795	4.965398	2.03E-03	-2.08E-02	6.807792	2575.712	128.7856	0.0362938	4.78E-02	14.77666
133.3966	6.669832	3.33E-03	-0.018173	7.025405	2593.718	129.6859	3.65E-02	4.82E-02	15.1626
178.2908	8.914539	4.98E-03	-1.49E-02	7.233677	2631.666	131.5833	3.70E-02	4.91E-02	15.46757
233.9355	11.69677	6.77E-03	-1.13E-02	7.427666	2686.638	134.3319	3.76E-02	5.04E-02	15.71347
297.6135	14.88068	8.42E-03	-7.99E-03	7.593853	2752.753	137.6377	3.84E-02	5.19E-02	15.91225
366.7343	18.33671	9.88E-03	-5.07E-03	7.744398	2826.81	141.3405	3.92E-02	0.0536058	16.08005
438.6536	21.93268	1.11E-02	-2.57E-03	7.880194	2906.13	145.3065	4.01E-02	5.54E-02	16.22646
511.0625	25.55313	1.22E-02	-3.92E-04	8.007254	2989.235	149.4618	4.11E-02	5.73E-02	16.35929
581.9853	29.09926	0.013188	1.54E-03	8.127872	3075.071	153.7536	4.20E-02	5.92E-02	16.48335
650.7157	32.53579	1.41E-02	3.31E-03	8.244576	3162.983	158.1491	4.30E-02	6.12E-02	16.60197
717.4631	35.87316	0.0148896	4.95E-03	8.358684	3252.473	162.6237	4.40E-02	6.32E-02	16.7172
783.0394	39.15197	1.57E-02	6.52E-03	8.471209	3343.305	167.1653	4.50E-02	6.52E-02	16.83036
848.1077	42.40538	1.65E-02	8.08E-03	8.582776	3435.356	171.7678	4.60E-02	6.72E-02	16.94225
913.2426	45.66213	1.72E-02	9.63E-03	8.693755	3528.67	176.4335	4.70E-02	6.92E-02	17.05338
978.8347	48.94173	1.80E-02	1.12E-02	8.804385	3623.227	181.1613	4.80E-02	0.0711647	17.16405
1045.193	52.25964	1.88E-02	1.27E-02	8.914722	3718.982	185.9491	4.90E-02	7.32E-02	17.27445
1112.364	55.6182	1.95E-02	1.42E-02	9.024904	3815.803	190.7901	5.00E-02	7.52E-02	17.38469
1180.391	59.01957	2.03E-02	0.0158563	9.134968	3913.59	195.6795	5.10E-02	7.72E-02	17.49483
1249.281	62.46407	2.12E-02	1.75E-02	9.245007	4012.326	200.6163	5.20E-02	7.92E-02	17.60491
1319.177	65.95886	2.20E-02	1.91E-02	9.355018	4112.067	205.6033	5.30E-02	8.12E-02	17.71495
1390.016	69.50081	2.28E-02	2.07E-02	9.465024	4212.745	210.6373	0.0540083	8.32E-02	17.82498
1461.737	73.08685	2.36E-02	2.23E-02	9.575024	4314.275	215.7138	0.0550175	8.52E-02	17.935
1534.062	76.70308	2.44E-02	2.40E-02	9.685024	4416.55	220.8275	5.60E-02	8.72E-02	18.04501
1606.731	80.33657	2.52E-02	2.56E-02	9.795023	4519.607	225.9803	5.71E-02	8.93E-02	18.15501
1679.182	83.95911	2.61E-02	2.73E-02	9.905023	4623.411	231.1706	0.0581102	9.14E-02	18.26502
1750.931	87.54655	2.69E-02	2.89E-02	10.01502	4727.922	236.3961	5.92E-02	9.35E-02	18.37502
1821.381	91.06905	2.76E-02	3.04E-02	10.12502	4833.069	241.6534	6.02E-02	9.56E-02	18.48502
1890.137	94.50686	2.83E-02	3.19E-02	10.23502	4938.838	246.9419	6.13E-02	9.78E-02	18.59502
1956.727	97.83636	2.90E-02	3.33E-02	10.34502	5045.216	252.2608	6.25E-02	0.100077	18.70502
2020.8	101.04	2.97E-02	3.46E-02	10.45502	5152.246	257.6123	6.36E-02	0.1023133	18.81502
2081.585	104.0793	3.04E-02	3.59E-02	10.56502	5259.977	262.9988	6.47E-02	0.1045307	18.92502
2137.508	106.8754	3.10E-02	0.0371115	10.67502	5368.49	268.4245	0.0657727	0.1067127	19.03502
2183.319	109.166	3.15E-02	3.81E-02	10.82462	5477.71	273.8855	0.0668439	0.1088551	19.14502
2216.258	110.8129	3.18E-02	3.88E-02	11.02966	5587.512	279.3756	6.79E-02	0.1109641	19.25502
2236.382	111.8191	3.21E-02	3.93E-02	11.31073	5697.624	284.8812	6.89E-02	0.1130508	19.36502
2253.317	112.6658	3.23E-02	3.97E-02	11.59941	5807.864	290.3932	7.00E-02	0.1151408	19.47502

ANNEXE I

Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps	Charge	Contraintes	Déplacements	Déformations	Temps
9354.74	467.737	13.81166	2.058439	250.3636	9410.461	470.523	17.60274	2.058439	307.5799
9355.709	467.7855	13.84256	2.058439	250.8116	9410.351	470.5175	17.64945	2.058439	308.219
9356.556	467.8278	13.87718	2.058439	251.3099	9410.168	470.5084	17.69509	2.058439	308.8618
9357.377	467.8688	13.91088	2.058439	251.8279	9409.961	470.498	17.74058	2.058439	309.5166
9358.133	467.9066	13.94702	2.058439	252.3767	9409.709	470.4854	17.78385	2.058439	310.1809
9358.986	467.9493	13.98252	2.058439	252.9471	9409.509	470.4754	17.82458	2.058439	310.8253
9359.977	467.9988	14.02051	2.058439	253.5314	9409.275	470.4638	17.86465	2.058439	311.475
9361.13	468.0565	14.05878	2.058439	254.1457	9409.009	470.4504	17.90713	2.058439	312.1208
9362.333	468.1166	14.09796	2.058439	254.741	9408.563	470.4281	17.95206	2.058439	312.7967
9363.462	468.1731	14.13715	2.058439	255.3528	9408.104	470.4052	17.99805	2.058439	313.477
9364.58	468.229	14.17436	2.058439	255.9198	9407.568	470.3784	18.04422	2.058439	314.1589
9365.641	468.282	14.2114	2.058439	256.4948	9407.004	470.3502	18.09334	2.058439	314.8805
9366.656	468.3328	14.24728	2.058439	257.0234	9406.303	470.3151	18.14512	2.058439	315.6324
9367.463	468.3731	14.2864	2.058439	257.5678	9405.573	470.2787	18.19934	2.058439	316.4302
9368.188	468.4094	14.32567	2.058439	258.0832	9404.859	470.243	18.25549	2.058439	317.2342
9368.857	468.4429	14.36454	2.058439	258.6092	9404.201	470.2101	18.31175	2.058439	318.0377
9369.629	468.4814	14.39948	2.058439	259.1121	9403.538	470.1769	18.36714	2.058439	318.8187
9370.442	468.5221	14.43165	2.058439	259.6223	9402.816	470.1408	18.41752	2.058439	319.5639
9371.227	468.5613	14.46429	2.058439	260.1385	9402.066	470.1033	18.46562	2.058439	320.2887
9371.928	468.5964	14.49781	2.058439	260.6678	9401.282	470.0641	18.50991	2.058439	321.0097
9372.488	468.6244	14.5344	2.058439	261.2067	9400.55	470.0275	18.55404	2.058439	321.7102
9373.059	468.6529	14.57124	2.058439	261.7511	9399.748	469.9874	18.59628	2.058439	322.3975
9373.656	468.6828	14.61062	2.058439	262.3065	9398.927	469.9464	18.63936	2.058439	323.0559
9374.424	468.7212	14.65005	2.058439	262.8715	9398.061	469.903	18.68297	2.058439	323.724
9375.314	468.7657	14.6899	2.058439	263.426	9397.207	469.8604	18.72736	2.058439	324.4116
9376.272	468.8136	14.72886	2.058439	263.9808	9396.283	469.8141	18.77307	2.058439	325.1372
9377.221	468.861	14.76735	2.058439	264.5285	9395.217	469.7608	18.81933	2.058439	325.8965
9378.097	468.9048	14.80748	2.058439	265.1201	9393.931	469.6965	18.86834	2.058439	326.6699
9378.956	468.9478	14.84744	2.058439	265.7162	9392.433	469.6216	18.91887	2.058439	327.4509
9379.758	468.9879	14.88646	2.058439	266.3107	9390.659	469.533	18.97185	2.058439	328.2555
9380.521	469.0261	14.92122	2.058439	266.839	9388.731	469.4366	19.02492	2.058439	329.0721
9381.258	469.0629	14.9529	2.058439	267.3337	9386.642	469.3321	19.07911	2.058439	329.892
9381.937	469.0968	14.98426	2.058439	267.8154	9384.499	469.2249	19.13229	2.058439	330.6933
9382.582	469.1291	15.01556	2.058439	268.2962	9382.191	469.1096	19.18513	2.058439	331.4776
9383.146	469.1573	15.04727	2.058439	268.7706	9379.745	468.9872	19.23613	2.058439	332.2544
9383.76	469.188	15.07673	2.058439	269.2115	9376.957	468.8478	19.28818	2.058439	333.0212
9384.489	469.2245	15.10519	2.058439	269.6527	9373.955	468.6978	19.33913	2.058439	333.7811
9385.263	469.2631	15.13423	2.058439	270.0891	9370.703	468.5352	19.38911	2.058439	334.5228
9386.029	469.3015	15.16403	2.058439	270.5487	9367.347	468.3673	19.43536	2.058439	335.2405
9386.624	469.3312	15.19649	2.058439	271.0193	9363.808	468.1904	19.47936	2.058439	335.9363
9387.243	469.3622	15.22898	2.058439	271.5184	9360.187	468.0093	19.52097	2.058439	336.5878
9387.894	469.3947	15.26185	2.058439	272.0334	9356.354	467.8177	19.56124	2.058439	337.1879
9388.714	469.4357	15.29256	2.058439	272.5479	9351.533	467.5767	19.60304	2.058439	337.7694
9389.598	469.4799	15.32267	2.058439	273.0542	9345.377	467.2689	19.64568	2.058439	338.3625
9390.474	469.5237	15.35466	2.058439	273.5743	9336.91	466.8455	19.69014	2.058439	338.9947
9391.253	469.5627	15.39068	2.058439	274.1273	9324.997	466.2498	19.73347	2.058439	339.6347
9391.867	469.5934	15.43106	2.058439	274.7166	9307.238	465.3619	19.77897	2.058439	340.3072
9392.365	469.6183	15.47427	2.058439	275.3096	9281.519	464.0759	19.82591	2.058439	340.9985
9392.781	469.6391	15.51667	2.058439	275.9073	9246.563	462.3282	19.87552	2.058439	341.7178

ANNEXE II

Essai emboutissage:

Tôle d'épaisseur 0.5mm essai 2

Charge	Contrainte	Deplacement	temps	Charge	Contrainte	Deplacement	temps
0.240612	8.02E-03	1.61E-03	1.48E-02	24.8736	0.8291199	1.93215	32.7071
0.9502888	3.17E-02	1.90E-03	0.3748477	25.13503	0.8378342	1.968504	33.22768
0.7817268	2.61E-02	2.11E-03	1.653848	25.37378	0.8457927	2.016956	33.90487
1.201077	4.00E-02	2.12E-03	2.663648	25.67997	0.8559991	2.060137	34.58442
4.159254	0.1386418	9.22E-03	3.754208	26.08761	0.8695869	2.108993	35.40577
7.90602	0.263534	1.74E-02	4.67128	25.98669	0.866223	2.159831	36.18995
13.20956	0.4403188	2.63E-02	5.380806	25.87369	0.8624563	2.214664	37.01705
17.12542	0.5708475	2.95E-02	5.865326	25.26791	0.8422635	2.261814	37.64731
20.51757	0.6839189	4.31E-02	6.346135	25.26837	0.8422791	2.305268	38.33478
22.19585	0.7398617	6.93E-02	6.803201	25.01378	0.8337926	2.344042	38.97232
22.66895	0.7556316	0.1128363	7.386775	24.85204	0.8284013	2.391484	39.65533
23.2363	0.7745435	0.1522704	7.858904	24.53048	0.8176826	2.442124	40.35944
23.22744	0.7742481	0.1952589	8.400044	24.54268	0.8180893	2.493	41.09886
23.49415	0.7831384	0.2274754	8.822699	24.51011	0.8170035	2.544065	42.02557
23.2827	0.7760899	0.2706707	9.323458	24.62408	0.8208028	2.592931	42.8428
23.41689	0.7805629	0.3126181	9.816139	24.6334	0.8211135	2.643709	43.60958
23.56363	0.7854545	0.358534	10.30083	24.37536	0.8125119	2.69443	44.34438
23.65682	0.7885606	0.4040267	10.8263	24.26811	0.8089371	2.742414	45.0627
23.75785	0.7919285	0.4526889	11.42433	24.39371	0.8131236	2.786881	45.83733
23.80488	0.7934961	0.5043894	12.14404	25.15169	0.8383895	2.830888	46.44391
23.83637	0.7945458	0.5551357	12.83658	25.59424	0.8531412	2.879169	47.18216
24.11597	0.8038656	0.6078527	13.57003	26.05158	0.868386	2.930642	47.86912
24.01788	0.8005961	0.6652559	14.38323	26.19762	0.8732539	2.981179	48.74817
24.4226	0.8140866	0.7178071	15.15456	26.48055	0.8826851	3.033398	49.54536
24.53881	0.8179602	0.7675409	15.82347	26.24522	0.8748406	3.086527	50.36462
25.28225	0.8427417	0.8065713	16.37551	25.758	0.8585998	3.142607	51.1499
25.84237	0.8614124	0.8490201	16.9717	25.05039	0.8350129	3.196061	52.02081
26.48626	0.8828754	0.8920934	17.61935	24.52469	0.8174896	3.251191	52.79205
26.92158	0.8973859	0.9434747	18.35212	24.2078	0.8069266	3.30613	53.56068
27.14503	0.9048343	0.9964385	19.1782	24.31259	0.8104198	3.356357	54.22066
27.39399	0.9131329	1.037816	19.88597	24.57444	0.8191479	3.405663	54.92438
27.30319	0.9101064	1.079976	20.50074	24.96747	0.8322491	3.4522	55.63692
27.36212	0.9120706	1.12141	21.02925	25.24096	0.8413652	3.5067	56.42617
27.43095	0.914365	1.173373	21.74191	25.72448	0.8574826	3.554738	57.12252
27.65401	0.9218003	1.214054	22.38614	26.2552	0.8751734	3.608264	57.81565
27.66662	0.9222206	1.25769	23.00952	26.75141	0.8917138	3.647765	58.33554
27.37622	0.9125406	1.300716	23.61504	27.12148	0.9040493	3.693969	59.01815
26.98313	0.8994376	1.34421	24.21282	27.40218	0.9134058	3.724528	59.47865
26.42499	0.880833	1.384629	24.76148	27.65937	0.921979	3.766218	60.10327
26.40666	0.8802221	1.413101	25.14477	27.99982	0.9333275	3.800297	60.54029
26.51642	0.8838807	1.45184	25.61716	28.60881	0.9536269	3.841114	61.14862
27.06977	0.9023258	1.49332	26.2063	29.47705	0.9825681	3.875458	61.66569
27.38796	0.9129321	1.537256	26.7706	30.58309	1.019436	3.905344	62.19877
27.24416	0.9081388	1.581438	27.37529	31.43669	1.04789	3.939373	62.6728
26.54004	0.8846679	1.617401	27.98309	32.38492	1.079497	3.968943	63.13823
25.59737	0.8532456	1.663195	28.64358	33.32814	1.110938	4.007796	63.67811
25.24415	0.8414716	1.70902	29.35924	34.61321	1.153774	4.037741	64.12118
25.06226	0.8354088	1.763263	30.09647	36.2097	1.20699	4.066179	64.53777
25.06662	0.8355541	1.807768	30.80505	37.60122	1.253374	4.094643	64.97389
24.88743	0.829581	1.853943	31.53421	39.06033	1.302011	4.122488	65.45244
24.89607	0.8298691	1.8862	32.04176	40.24929	1.341643	4.149657	65.92137

ANNEXE II

Essai emboutissage:

Tôle d'épaisseur 0.5mm essai 2

Charge	Contrainte	Deplacement	temps	Charge	Contrainte	Deplacement	temps
17433.67	581.1224	47.22825	1023.786	17377.82	579.2606	47.91004	1043.04
17436.48	581.2159	47.23304	1024.034	17110.81	570.3602	47.95047	1043.986
17439.29	581.3095	47.23731	1024.293	16736.03	557.8677	47.98247	1044.938
17442.13	581.4044	47.23941	1024.526	16451.29	548.3763	48.023	1045.747
17444.88	581.4962	47.24165	1024.801	16189.49	539.6498	48.05536	1046.616
17447.45	581.5817	47.25108	1025.056	15980.44	532.6814	48.09547	1047.413
17449.92	581.6641	47.26747	1025.338	15758.53	525.2842	48.12799	1048.341
17452.37	581.7457	47.28567	1025.622	15581.04	519.3681	48.16959	1049.159
17454.82	581.8273	47.29816	1025.911	15406.06	513.5353	48.20292	1050.047
17457.2	581.9066	47.30465	1026.169	15267.3	508.91	48.24372	1050.818
17459.64	581.9881	47.30914	1026.422	15119.67	503.9889	48.27472	1051.699
17462.21	582.0738	47.31205	1026.689	14993.34	499.778	48.30443	1052.579
17465.04	582.168	47.31742	1026.968	14871.55	495.7182	48.3333	1053.471
17467.93	582.2642	47.32675	1027.231	14755.82	491.8606	48.36652	1054.364
17470.83	582.361	47.33842	1027.516	14644.44	488.1481	48.4073	1055.26
17473.6	582.4534	47.35162	1027.801	14527.87	484.2623	48.44513	1056.278
17476.25	582.5417	47.36119	1028.091	14426.76	480.8921	48.48402	1057.309
17478.79	582.6262	47.37049	1028.338	14339.56	477.9854	48.52752	1058.302
17481.34	582.7112	47.37606	1028.6	14263.13	475.4378	48.56957	1059.279
17483.97	582.7991	47.38392	1028.944	14195.23	473.1745	48.61539	1060.234
17486.67	582.8889	47.39964	1029.329	14126.55	470.8851	48.64896	1061.248
17489.27	582.9758	47.4181	1029.738	14067.29	468.9098	48.68723	1062.169
17491.82	583.0606	47.4368	1030.063	14004.5	466.8165	48.71683	1063.106
17494.29	583.1432	47.4464	1030.353	13952.9	465.0966	48.75721	1063.918
17496.93	583.2309	47.45897	1030.663	13897.35	463.2451	48.78957	1064.818
17499.68	583.3226	47.47422	1031.002	13847.18	461.5726	48.83128	1065.689
17502.69	583.4229	47.492	1031.374	13787.84	459.5946	48.8632	1066.681
17505.61	583.5203	47.50613	1031.692	13721.65	457.3884	48.90509	1067.692
17508.37	583.6123	47.51653	1032.028	13662.45	455.4151	48.93467	1068.531
17510.84	583.6945	47.52393	1032.335	13603.27	453.4424	48.96394	1069.342
17513.33	583.7775	47.5296	1032.661	13557.61	451.9202	48.98942	1069.979
17515.82	583.8607	47.53872	1032.942	13499.23	449.9743	49.01962	1070.797
17518.51	583.9502	47.55186	1033.24	13446.39	448.2129	49.05909	1071.484
17521.17	584.0391	47.56839	1033.553	13385.73	446.1909	49.09077	1072.313
17524.07	584.1357	47.5825	1033.929	13333.66	444.4555	49.12891	1073.133
17526.85	584.2283	47.59308	1034.319	13290.33	443.011	49.15532	1073.892
17529.61	584.3203	47.60009	1034.703	13258	441.9333	49.18364	1074.637
17532.1	584.4033	47.61633	1035.078	13231.91	441.0637	49.20868	1075.246
17534.73	584.4911	47.63566	1035.494	13203.4	440.1133	49.2401	1076.044
17537.39	584.5795	47.65704	1035.894	13178.29	439.2764	49.27851	1076.81
17540.05	584.6684	47.66784	1036.278	13153.83	438.461	49.31153	1077.728
17542.63	584.7542	47.67932	1036.61	13131.83	437.7276	49.34901	1078.559
17545.2	584.8398	47.69368	1036.974	13112.04	437.0679	49.37893	1079.448
17547.82	584.9274	47.71265	1037.355	13093.69	436.4563	49.4175	1080.32
17550.38	585.0126	47.72889	1037.779	13076.64	435.888	49.44859	1081.3
17552.94	585.0978	47.7408	1038.215	13057.07	435.2355	49.48725	1082.275
17555.28	585.1759	47.75874	1038.706	13022.88	434.0959	49.52024	1083.293
17557.45	585.2484	47.77926	1039.331	12982.3	432.7433	49.56232	1084.176
17557.67	585.2556	47.81086	1040.126	12904.04	430.1348	49.59655	1085.073
17554.31	585.1438	47.83842	1041.059	12802.56	426.7521	49.63601	1085.924
17540.5	584.6834	47.87701	1042.032	12696.65	423.2216	49.6582	1086.848

ANNEXE II

Essai emboutissage

Tôle d'épaisseur 0.7mm essai 2

Charge	Contrainte	Deplacement	temps	Charge	Contrainte	Deplacement	temps
6.00E-01	1.43E-02	-2.95E-04	1.01E-02	2.01E+01	4.78E-01	2.00E+00	2.96E+01
2.22E-01	5.29E-03	-4.38E-04	1.00E-01	1.98E+01	4.72E-01	2.05E+00	3.02E+01
8.03E-01	1.91E-02	-2.65E-04	1.28E+00	1.95E+01	4.65E-01	2.10E+00	3.08E+01
3.04E+00	7.24E-02	9.37E-05	2.24E+00	1.98E+01	4.71E-01	2.14E+00	3.15E+01
6.72E+00	1.60E-01	4.34E-04	3.26E+00	2.02E+01	4.81E-01	2.18E+00	3.20E+01
1.15E+01	2.73E-01	6.03E-04	4.02E+00	2.05E+01	4.87E-01	2.22E+00	3.25E+01
1.50E+01	3.57E-01	4.40E-04	4.52E+00	2.05E+01	4.89E-01	2.28E+00	3.31E+01
1.81E+01	4.30E-01	3.25E-04	4.84E+00	2.04E+01	4.86E-01	2.34E+00	3.38E+01
2.02E+01	4.81E-01	1.28E-02	5.09E+00	2.08E+01	4.96E-01	2.39E+00	3.46E+01
2.09E+01	4.97E-01	4.29E-02	5.42E+00	2.12E+01	5.05E-01	2.45E+00	3.52E+01
2.13E+01	5.07E-01	8.07E-02	5.85E+00	2.17E+01	5.16E-01	2.50E+00	3.59E+01
2.11E+01	5.03E-01	1.25E-01	6.31E+00	2.19E+01	5.20E-01	2.56E+00	3.66E+01
2.16E+01	5.15E-01	1.58E-01	6.73E+00	2.18E+01	5.19E-01	2.63E+00	3.74E+01
2.17E+01	5.16E-01	1.99E-01	7.10E+00	2.20E+01	5.24E-01	2.69E+00	3.82E+01
2.19E+01	5.20E-01	2.37E-01	7.52E+00	2.17E+01	5.18E-01	2.74E+00	3.89E+01
2.16E+01	5.14E-01	2.85E-01	8.03E+00	2.16E+01	5.13E-01	2.80E+00	3.96E+01
2.14E+01	5.09E-01	3.36E-01	8.59E+00	2.10E+01	5.00E-01	2.86E+00	4.04E+01
2.15E+01	5.12E-01	3.77E-01	9.14E+00	2.09E+01	4.97E-01	2.93E+00	4.12E+01
2.16E+01	5.15E-01	4.20E-01	9.60E+00	2.07E+01	4.93E-01	2.99E+00	4.21E+01
2.18E+01	5.18E-01	4.65E-01	1.02E+01	2.06E+01	4.90E-01	3.05E+00	4.29E+01
2.17E+01	5.16E-01	5.23E-01	1.08E+01	2.05E+01	4.87E-01	3.10E+00	4.36E+01
2.20E+01	5.23E-01	5.74E-01	1.15E+01	2.07E+01	4.92E-01	3.15E+00	4.43E+01
2.21E+01	5.26E-01	6.24E-01	1.21E+01	2.08E+01	4.95E-01	3.21E+00	4.50E+01
2.24E+01	5.34E-01	6.62E-01	1.26E+01	2.08E+01	4.96E-01	3.26E+00	4.57E+01
2.27E+01	5.40E-01	7.05E-01	1.31E+01	2.08E+01	4.96E-01	3.30E+00	4.63E+01
2.28E+01	5.44E-01	7.48E-01	1.38E+01	2.07E+01	4.94E-01	3.34E+00	4.69E+01
2.28E+01	5.43E-01	8.02E-01	1.45E+01	2.09E+01	4.98E-01	3.38E+00	4.74E+01
2.24E+01	5.34E-01	8.61E-01	1.53E+01	2.07E+01	4.93E-01	3.43E+00	4.80E+01
2.21E+01	5.27E-01	9.19E-01	1.61E+01	2.05E+01	4.89E-01	3.47E+00	4.86E+01
2.19E+01	5.21E-01	9.76E-01	1.68E+01	2.05E+01	4.87E-01	3.50E+00	4.91E+01
2.17E+01	5.16E-01	1.04E+00	1.74E+01	2.05E+01	4.87E-01	3.54E+00	4.94E+01
2.14E+01	5.08E-01	1.10E+00	1.82E+01	2.05E+01	4.87E-01	3.58E+00	5.00E+01
2.09E+01	4.97E-01	1.15E+00	1.88E+01	2.02E+01	4.82E-01	3.62E+00	5.05E+01
2.05E+01	4.87E-01	1.19E+00	1.94E+01	2.05E+01	4.87E-01	3.66E+00	5.11E+01
2.05E+01	4.89E-01	1.23E+00	2.00E+01	2.05E+01	4.88E-01	3.70E+00	5.15E+01
2.05E+01	4.87E-01	1.28E+00	2.06E+01	2.08E+01	4.96E-01	3.74E+00	5.20E+01
2.03E+01	4.82E-01	1.34E+00	2.13E+01	2.08E+01	4.95E-01	3.78E+00	5.26E+01
1.97E+01	4.70E-01	1.40E+00	2.19E+01	2.10E+01	5.00E-01	3.82E+00	5.32E+01
1.96E+01	4.67E-01	1.45E+00	2.25E+01	2.12E+01	5.04E-01	3.87E+00	5.37E+01
1.97E+01	4.69E-01	1.49E+00	2.31E+01	2.12E+01	5.04E-01	3.92E+00	5.43E+01
2.01E+01	4.78E-01	1.55E+00	2.38E+01	2.12E+01	5.04E-01	3.97E+00	5.50E+01
2.03E+01	4.83E-01	1.59E+00	2.44E+01	2.08E+01	4.95E-01	4.02E+00	5.57E+01
2.06E+01	4.90E-01	1.65E+00	2.51E+01	2.10E+01	4.99E-01	4.07E+00	5.64E+01
2.07E+01	4.92E-01	1.70E+00	2.57E+01	2.09E+01	4.98E-01	4.13E+00	5.71E+01
2.06E+01	4.92E-01	1.76E+00	2.65E+01	2.13E+01	5.06E-01	4.18E+00	5.77E+01
2.03E+01	4.84E-01	1.82E+00	2.73E+01	2.10E+01	5.00E-01	4.24E+00	5.85E+01
2.00E+01	4.76E-01	1.88E+00	2.80E+01	2.09E+01	4.98E-01	4.28E+00	5.92E+01
1.99E+01	4.75E-01	1.92E+00	2.86E+01	2.08E+01	4.95E-01	4.33E+00	5.97E+01
2.01E+01	4.79E-01	1.95E+00	2.91E+01	2.09E+01	4.97E-01	4.36E+00	6.02E+01
				2.08E+01	4.94E-01	4.41E+00	6.08E+01
6.92E+03	1.65E+02	1.98E+01	2.81E+02	7.14E+03	1.70E+02	2.01E+01	2.87E+02

ANNEXE II

Essai emboutissage

Tôle d'épaisseur 0.7mm essai 2

1.47E+04	3.50E+02	3.58E+01	5.57E+02	1.00E+04	2.39E+02	3.81E+01	5.96E+02
1.46E+04	3.49E+02	3.58E+01	5.57E+02	9.88E+03	2.35E+02	3.81E+01	5.96E+02
1.46E+04	3.48E+02	3.59E+01	5.58E+02	9.71E+03	2.31E+02	3.82E+01	5.97E+02
1.46E+04	3.47E+02	3.59E+01	5.59E+02	9.58E+03	2.28E+02	3.82E+01	5.98E+02
1.46E+04	3.47E+02	3.60E+01	5.60E+02	9.40E+03	2.24E+02	3.82E+01	5.99E+02
1.45E+04	3.46E+02	3.60E+01	5.60E+02	9.21E+03	2.19E+02	3.83E+01	5.99E+02
1.45E+04	3.45E+02	3.60E+01	5.61E+02	8.96E+03	2.13E+02	3.84E+01	6.00E+02
1.44E+04	3.44E+02	3.61E+01	5.62E+02	8.74E+03	2.08E+02	3.84E+01	6.01E+02
1.44E+04	3.43E+02	3.61E+01	5.63E+02	8.48E+03	2.02E+02	3.85E+01	6.02E+02
1.43E+04	3.42E+02	3.62E+01	5.64E+02	8.34E+03	1.99E+02	3.85E+01	6.02E+02
1.43E+04	3.41E+02	3.62E+01	5.64E+02	7.96E+03	1.90E+02	3.86E+01	6.03E+02
1.43E+04	3.39E+02	3.63E+01	5.65E+02	7.96E+03	1.90E+02	3.86E+01	6.03E+02
1.42E+04	3.38E+02	3.63E+01	5.66E+02				
1.42E+04	3.37E+02	3.63E+01	5.66E+02				
1.41E+04	3.36E+02	3.64E+01	5.67E+02				
1.40E+04	3.34E+02	3.64E+01	5.68E+02				
1.40E+04	3.33E+02	3.65E+01	5.69E+02				
1.39E+04	3.32E+02	3.65E+01	5.69E+02				
1.39E+04	3.30E+02	3.66E+01	5.70E+02				
1.38E+04	3.28E+02	3.66E+01	5.71E+02				
1.37E+04	3.27E+02	3.66E+01	5.72E+02				
1.37E+04	3.26E+02	3.67E+01	5.72E+02				
1.37E+04	3.25E+02	3.67E+01	5.73E+02				
1.36E+04	3.24E+02	3.68E+01	5.74E+02				
1.36E+04	3.23E+02	3.68E+01	5.75E+02				
1.35E+04	3.21E+02	3.68E+01	5.75E+02				
1.34E+04	3.20E+02	3.69E+01	5.76E+02				
1.33E+04	3.18E+02	3.69E+01	5.77E+02				
1.33E+04	3.16E+02	3.70E+01	5.78E+02				
1.32E+04	3.14E+02	3.70E+01	5.78E+02				
1.31E+04	3.12E+02	3.71E+01	5.79E+02				
1.30E+04	3.10E+02	3.71E+01	5.80E+02				
1.29E+04	3.07E+02	3.71E+01	5.81E+02				
1.28E+04	3.05E+02	3.72E+01	5.81E+02				
1.27E+04	3.03E+02	3.72E+01	5.82E+02				
1.26E+04	2.99E+02	3.73E+01	5.83E+02				
1.24E+04	2.96E+02	3.73E+01	5.83E+02				
1.23E+04	2.92E+02	3.74E+01	5.84E+02				
1.21E+04	2.88E+02	3.74E+01	5.85E+02				
1.20E+04	2.85E+02	3.75E+01	5.86E+02				
1.18E+04	2.80E+02	3.75E+01	5.87E+02				
1.17E+04	2.77E+02	3.76E+01	5.87E+02				
1.15E+04	2.74E+02	3.76E+01	5.88E+02				
1.14E+04	2.71E+02	3.76E+01	5.89E+02				
1.12E+04	2.67E+02	3.77E+01	5.89E+02				
1.11E+04	2.64E+02	3.77E+01	5.90E+02				
1.09E+04	2.60E+02	3.78E+01	5.91E+02				
1.08E+04	2.56E+02	3.78E+01	5.92E+02				
1.06E+04	2.53E+02	3.79E+01	5.93E+02				

ANNEXE II

Essai d'emboutissage

Tôle d'épaisseur 1mm Essai2

Charge	Contraintes	Deplacement	Temps	Charge	Contraintes	Deplacement	Temps
-0.1204967	-2.01E-03	6.73E-03	1.50E-02	87.05257	1.450876	0.6561797	15.78143
-0.1204967	-2.01E-03	6.73E-03	1.50E-02	88.71382	1.478564	0.6632331	15.92458
-0.6842422	-1.14E-02	7.73E-03	1.315006	90.32436	1.505406	0.6680611	16.07021
-0.6708202	-1.12E-02	7.73E-03	2.246006	92.05128	1.534188	0.6775559	16.21596
-0.5292293	-8.82E-03	7.66E-03	3.215406	93.92957	1.565493	0.6913782	16.36224
-0.2582346	-4.30E-03	7.38E-03	4.123486	95.79806	1.596634	0.7089896	16.50864
2.456595	4.09E-02	8.84E-03	4.889782	97.63969	1.627328	0.7210484	16.63318
6.16702	0.1027837	0.0104192	5.641457	99.54677	1.659113	0.7304979	16.77537
11.63497	0.1939162	1.24E-02	6.165051	101.474	1.691233	0.7365287	16.91671
15.36127	0.2560211	1.31E-02	6.601305	103.377	1.72295	0.7414111	17.08362
18.8403	0.3140049	2.61E-02	7.013275	105.2481	1.754135	0.743828	17.23327
21.24751	0.3541251	0.0444245	7.49092	107.0835	1.784724	0.7455221	17.38458
23.47752	0.391292	0.0721952	7.976842	108.9626	1.816044	0.7477212	17.51057
25.49099	0.4248498	9.62E-02	8.389556	110.899	1.848317	0.7591339	17.65404
27.37647	0.4562745	0.1202692	8.701283	112.9508	1.882513	0.7750401	17.79593
29.17281	0.4862135	0.1387622	9.022172	115.0081	1.916802	0.7933357	17.941
30.71632	0.5119386	0.1570687	9.302695	116.9217	1.948696	0.8037809	18.06439
32.36147	0.5393578	0.1777591	9.576977	118.7707	1.979512	0.8105537	18.18408
33.88807	0.5648011	0.1991234	9.775938	120.54	2.009	0.8144372	18.2987
35.3618	0.5893633	0.2178751	9.980587	122.2842	2.038069	0.8175644	18.41156
36.61466	0.6102444	0.2399602	10.19331	124.0429	2.067382	0.8233618	18.52305
37.92294	0.632049	0.2626866	10.45278	125.8525	2.097542	0.8338764	18.63393
39.27121	0.6545202	0.2829589	10.70122	127.5619	2.126032	0.8470701	18.7444
40.87157	0.6811928	0.2936687	10.9568	129.3572	2.155953	0.8597511	18.85467
42.44564	0.7074273	0.3010381	11.18961	131.4579	2.190964	0.8707858	18.98682
44.05574	0.7342624	0.3107461	11.39729	133.8051	2.230086	0.8796595	19.1233
45.56915	0.7594858	0.3283988	11.59538	136.3234	2.272057	0.8861607	19.26503
47.13046	0.7855077	0.347493	11.78654	138.4468	2.307447	0.8893538	19.38667
48.73993	0.8123322	0.3688184	11.99639	140.3945	2.339908	0.8916448	19.50534
50.28833	0.8381389	0.3840799	12.18659	142.0116	2.366859	0.8963752	19.61941
51.7584	0.86264	0.4040252	12.3884	143.7192	2.39532	0.9058064	19.73195
53.07838	0.8846396	0.4202057	12.5658	145.4852	2.424754	0.9197127	19.84328
54.46392	0.907732	0.435195	12.74084	147.5947	2.459911	0.9334031	19.95405
56.08076	0.9346794	0.4541444	12.92053	149.7032	2.495053	0.9452507	20.06447
58.00433	0.9667388	0.4724459	13.12348	151.8437	2.530729	0.9535215	20.17471
59.96479	0.9994132	0.4931963	13.33181	153.7181	2.561968	0.9594781	20.28484
61.84163	1.030694	0.5046974	13.54606	155.7744	2.596239	0.9625293	20.39491
63.46153	1.057692	0.5142537	13.74058	157.7652	2.629421	0.9643899	20.50495
64.9994	1.083323	0.5198135	13.93233	159.8644	2.664407	0.9654312	20.61498
66.66496	1.111083	0.5230995	14.07559	161.8288	2.697147	0.9663334	20.72499
68.36305	1.139384	0.5260989	14.20859	163.8343	2.730571	0.9683332	20.835
70.36909	1.172818	0.5376682	14.35184	165.8377	2.763962	0.9731623	20.945
72.20885	1.203481	0.5520672	14.49509	167.9608	2.799347	0.9810029	21.055
74.02714	1.233786	0.5691555	14.64039	170.2019	2.836699	0.9954315	21.165
75.49521	1.258253	0.5791455	14.7641	172.4374	2.873957	1.01011	21.27501
77.085	1.28475	0.5876958	14.8839	174.5254	2.908756	1.023753	21.38501
78.74226	1.312371	0.5931616	15.0206	176.5399	2.942332	1.030501	21.49501
80.43166	1.340528	0.602234	15.1819	178.5628	2.976047	1.034754	21.60501
81.97572	1.366262	0.615191	15.35151	180.8656	3.014426	1.036985	21.71501
83.59267	1.393211	0.631901	15.50569	183.2736	3.054561	1.038428	21.82501
85.30447	1.421741	0.6455395	15.63644	185.791	3.096517	1.043558	21.93501

ANNEXE II

Essai d'emboutissage

Tôle d'épaisseur 1mm Essai2

Charge	Contraintes	Deplacement	Temps	Charge	Contraintes	Deplacement	Temps
13772.69	229.5449	22.73135	439.055	14030.8	233.8466	22.99867	444.8652
13776.71	229.6118	22.73891	439.165	14034.68	233.9113	23.00509	445.0703
13780.82	229.6804	22.75129	439.275	14038.88	233.9813	23.00892	445.2151
13785.05	229.7508	22.76383	439.385	14043.28	234.0546	23.01147	445.3511
13789.49	229.8248	22.77628	439.495	14047.99	234.1332	23.01348	445.485
13794.08	229.9014	22.78336	439.605	14052.69	234.2115	23.01744	445.616
13798.77	229.9795	22.78747	439.715	14057.14	234.2857	23.02479	445.746
13803.26	230.0543	22.78998	439.825	14061.04	234.3507	23.03458	445.8634
13807.67	230.1279	22.79142	439.935	14064.67	234.4112	23.04521	445.9789
13812.02	230.2004	22.79235	440.045	14068	234.4667	23.05445	446.0915
13816.33	230.2722	22.79303	440.155	14071.21	234.5201	23.06294	446.2031
13820.72	230.3453	22.79359	440.265	14074.31	234.5718	23.07014	446.3139
13825	230.4166	22.79398	440.375	14077.34	234.6223	23.07601	446.4244
13829.41	230.4902	22.79523	440.485	14080.37	234.6729	23.08015	446.5347
13833.76	230.5627	22.7993	440.595	14083.4	234.7233	23.08244	446.6448
13838.23	230.6371	22.80526	440.705	14086.32	234.772	23.08355	446.7549
13843.26	230.7209	22.81395	440.815	14089.08	234.818	23.0842	446.865
13848.16	230.8026	22.82444	440.925	14091.87	234.8646	23.08464	446.975
13853.44	230.8906	22.83574	441.035	14094.9	234.915	23.08515	447.085
13858.36	230.9727	22.84423	441.145	14097.89	234.9648	23.08552	447.195
13863.49	231.0582	22.84904	441.255	14100.93	235.0154	23.08578	447.305
13868.5	231.1416	22.85229	441.365	14103.77	235.0628	23.08611	447.415
13873.86	231.2309	22.85603	441.4866	14107.05	235.1174	23.08705	447.525
13879.43	231.3239	22.85942	441.6099	14110.63	235.1771	23.08939	447.635
13885.18	231.4196	22.86229	441.7359	14114.62	235.2437	23.09365	447.745
13890.75	231.5126	22.86392	441.8512	14118.71	235.3119	23.09892	447.855
13896.1	231.6016	22.8652	441.9654	14122.88	235.3814	23.10677	447.965
13901.49	231.6916	22.86754	442.0773	14126.91	235.4485	23.11909	448.075
13906.98	231.783	22.87348	442.1885	14131.1	235.5184	23.13277	448.185
13912.97	231.8828	22.88041	442.2992	14135.18	235.5863	23.14441	448.295
13918.77	231.9795	22.88568	442.4095	14139.51	235.6586	23.15056	448.405
13924.59	232.0766	22.88841	442.5197	14143.77	235.7294	23.15433	448.515
13930.22	232.1703	22.89177	442.6299	14148.02	235.8003	23.15634	448.625
13935.96	232.266	22.89512	442.7399	14152.11	235.8686	23.15755	448.735
13941.87	232.3645	22.89872	442.85	14156.06	235.9344	23.15834	448.845
13947.69	232.4615	22.90483	442.96	14159.9	235.9983	23.1591	448.955
13953.85	232.5642	22.91457	443.07	14163.52	236.0586	23.1609	449.065
13959.98	232.6663	22.92441	443.18	14166.76	236.1126	23.16551	449.175
13966.43	232.7739	22.93091	443.29	14169.86	236.1643	23.17306	449.285
13972.75	232.8791	22.93441	443.4	14172.93	236.2155	23.18273	449.395
13979.1	232.985	22.93662	443.51	14176.13	236.2688	23.19447	449.5166
13985.08	233.0846	22.93791	443.62	14179.49	236.3248	23.20645	449.6619
13990.91	233.1818	22.93881	443.73	14183.06	236.3843	23.21712	449.8363
13996.4	233.2733	22.93948	443.84	14186.54	236.4423	23.22375	450.0316
14001.55	233.3591	22.9402	443.95	14189.75	236.4959	23.22757	450.2376
14006.42	233.4404	22.94136	444.06	14192.5	236.5417	23.22969	450.4279
14010.75	233.5125	22.94373	444.17	14195.47	236.5912	23.23134	450.6171
14015.04	233.584	22.94781	444.28	14198.31	236.6386	23.23265	450.781
14018.98	233.6497	22.95765	444.39	14201.22	236.6869	23.23421	450.9396
14023.15	233.7192	22.97201	444.5	14203.66	236.7276	23.23742	451.0701
14026.92	233.7821	22.98766	444.676	14206.24	236.7707	23.24406	451.1939

ANNEXE II

Essai d'emboutissage Tôle d'épaisseur 1mm Essai2

Charge	Contraintes	Deplacement	Temps	Charge	Contraintes	Deplacement	Temps
26188.02	436.4669	59.77814	1526.927	26108.5	435.1417	60.32433	1544.03
26194.69	436.5782	59.77896	1527.159	26115.45	435.2575	60.33891	1544.22
26201.83	436.6972	59.77987	1527.375	26121.65	435.3609	60.34897	1544.394
26209.22	436.8203	59.78283	1527.575	26127.5	435.4584	60.35575	1544.555
26216.61	436.9435	59.79245	1527.746	26133.16	435.5527	60.36011	1544.71
26223.61	437.0601	59.80771	1527.908	26138.71	435.6452	60.36292	1544.883
26231.03	437.1837	59.82399	1528.063	26139.18	435.6529	60.36471	1545.246
26237.98	437.2997	59.83596	1528.192	26138.89	435.6482	60.37955	1545.738
26244.86	437.4144	59.8429	1528.337	26137.52	435.6253	60.39732	1546.316
26252.13	437.5355	59.84685	1528.48	26140.57	435.6762	60.41811	1546.816
26259.63	437.6605	59.84891	1528.625	26143.84	435.7307	60.42664	1547.229
26267.03	437.7839	59.85041	1528.793	26148.54	435.8091	60.43282	1547.588
26273.31	437.8886	59.85159	1528.966	26154.2	435.9033	60.43717	1547.875
26279.4	437.99	59.85227	1529.144	26160.92	436.0153	60.44479	1548.135
26285.47	438.0912	59.85276	1529.302	26166.66	436.1111	60.46221	1548.553
26291.51	438.1918	59.85452	1529.512	26166.76	436.1126	60.49162	1549.162
26297.85	438.2975	59.85547	1529.751	26157.75	435.9624	60.52507	1550.016
26303.91	438.3985	59.85715	1529.984	26140.98	435.683	60.5624	1550.958
26309.96	438.4994	59.85867	1530.166	26125.56	435.4259	60.59478	1551.966
26315.41	438.5901	59.86541	1530.337	26116.08	435.268	60.62339	1552.829
26320.86	438.6809	59.88057	1530.562	26113.99	435.2331	60.64058	1553.478
26326.13	438.7687	59.89713	1530.817	26114.95	435.2491	60.6531	1553.868
26331.45	438.8575	59.91162	1531.089	26118.01	435.3002	60.66702	1554.164
26336.39	438.9398	59.9178	1531.326	26121.8	435.3634	60.68575	1554.477
26341.26	439.021	59.92191	1531.582	26126.38	435.4398	60.70327	1554.797
26345.93	439.0988	59.92432	1531.857	26131.25	435.5208	60.71679	1555.122
26350.95	439.1825	59.93166	1532.139	26136.55	435.6091	60.72305	1555.361
26356	439.2666	59.94014	1532.382	26141.06	435.6844	60.72882	1555.76
26361.4	439.3567	59.953	1532.641	26135.99	435.5999	60.74582	1556.35
26366.41	439.4402	59.96576	1532.973	25132.04	418.8674	60.79414	1557.186
26371.7	439.5283	59.97912	1533.389	23499.87	391.6645	60.86428	1558.109
26376.88	439.6147	59.98948	1533.769	21277.41	354.6235	60.94665	1559.098
26382.04	439.7006	59.99524	1534.06	19681.91	328.0318	61.01829	1560.141
26386.84	439.7806	59.9989	1534.26	18389.07	306.4844	61.09186	1561.207
26391.41	439.8568	60.00044	1534.446	17453.94	290.8989	61.16289	1562.289
26390.67	439.8445	60.01516	1534.809	16696.89	278.2816	61.22433	1563.378
26375.9	439.5983	60.04088	1535.403	16111.35	268.5224	61.2817	1564.461
26333.5	438.8917	60.07777	1536.243	15650.03	260.8338	61.33669	1565.545
26272.45	437.8742	60.10752	1537.179	15294.54	254.909	61.3938	1566.627
26208.38	436.8063	60.14174	1538.184	15014.54	250.2422	61.4502	1567.732
26152.76	435.8793	60.17167	1539.232	14797.01	246.6168	61.50257	1568.84
26114.14	435.2357	60.21086	1540.291	14614.9	243.5817	61.56215	1569.954
26087.58	434.793	60.23904	1541.164	14466.64	241.1107	61.612	1571.058
26078.1	434.6349	60.26471	1541.803	14336.42	238.9403	61.66382	1572.151
26074.39	434.5732	60.27577	1542.193	14224.5	237.0751	61.71413	1573.239
26076.07	434.6011	60.28344	1542.531	14128.21	235.4701	61.76956	1574.324
26080.03	434.6672	60.2875	1542.809	14041.18	234.0197	61.8201	1575.419
26085.35	434.7559	60.29035	1543.042	13963.49	232.7248	61.87067	1576.504
26090.38	434.8396	60.2927	1543.254	13878.8	231.3134	61.90971	1577.61
26095.58	434.9263	60.29801	1543.519	13817.8	230.2967	61.97812	1578.655
26101.61	435.0269	60.30924	1543.791	13753.9	229.2317	62.04799	1579.755

ANNEX III

1. Tableau 1: Les Différents points de mesure une d'épaisseur pour 0.5 mm.

-Avant essai :

position \ Numéro d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	0,56	0,59	0,57
2	0,56	0,57	0,58
3	0,58	0,58	0,55
4	0,5	0,55	0,54
5	0,52	0,54	0,57
6	0,52	0,54	0,57
7	0,57	0,57	0,56
8	0,56	0,56	0,53
9	0,52	0,57	0,54

-Après essai :

position \ Numéro d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	0,54	0,48	0,47
2	0,54	0,47	0,45
3	0,5	0,5	0,52
4	0,48	0,48	0,5
5	0,5	0,48	0,47
6	0,5	0,5	0,52
7	0,5	0,5	0,52
8	0,5	0,52	0,47
9	0,52	0,5	0,52

2. Tableau 2: des Différents points de mesure pour tôle d'épaisseur pour 0.7 mm.

-Avant essai :

position	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	0,7	0,65	0,65
2	0,68	0,66	0,66
3	0,64	0,68	0,68
4	0,69	0,66	0,66
5	0,65	0,65	0,69
6	0,65	0,7	0,66
7	0,7	0,69	0,66
8	0,65	0,65	0,65
9	0,68	0,69	0,65

ANNEX III

-Après essai :

position \ Numéro d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	0,59	0,64	0,63
2	0,5	0,55	0,54
3	0,54	0,59	0,64
4	0,55	0,6	0,64
5	0,5	0,54	0,52
6	0,54	0,66	0,62
7	0,59	0,6	0,57
8	0,57	0,55	0,55
9	0,59	0,68	0,65

3. **Tableau 3:** des Différents points de mesure pour tôle d'épaisseur pour 1 mm.

-Avant essai :

position \ Numéro d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	1	0,96	1,01
2	1	0,96	1,04
3	1,01	0,96	1,06
4	1,01	0,96	0,97
5	1	0,96	1
6	1	0,96	1,01
7	1,01	1	1,02
8	0,99	0,97	1
9	1	0,99	1,03

-Après essai :

position \ Numéro d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	0,94	0,94	0,89
2	0,91	0,93	0,9
3	0,94	0	0,89
4	0,92	0,95	0,88
5	0,94	0,94	0,9
6	0,92	0	0,92
7	0,93	0,97	0,93
8	0,92	0,96	0,92
9	0,92	0	0,93

ANNEX III

4. Tableau 4: Les longueurs L1, L2, L3 pour tôles d'épaisseurs 0.5, 0.7 et 1 mm.

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
L1	79	79	78,75	80,9	71,6	69,3	73,4	86,5	63,4
L2	88,9	83	84,9	87,5	89	92,1	85	92,9	93
L3	75,7	80	78,1	72,8	63,6	71,4	69,1	75	70,8

5. Tableau 5: La hauteur h pour tôles d'épaisseurs 0.5, 0.7 et 1 mm.

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
h	43	39	47	48.5	33	35	36.9	66	32

6. Tableau 6: Les largeurs S₁, S₂, S₃ de les tôle déformés d'épaisseur de (0.5mm, 0.7mm, 1mm).

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
S1	52.45	54.1	53.9	58.2	56.5	53.6	55.2	58	56.9
S2	50	52.9	50	56.2	55	52	53	59	56
S3	52,2	54,5	53,5	57	56,3	54,9	55	57,9	57,1

ANNEX III

7. Tableau 7: Les convections H (S1) pour les tôles déformés d'épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm)

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
H11	2,3	2,4	2,5	5,3	3,9	2,1	5,3	2,4	1,9
H12	4,8	5,1	4,1	6,7	4,2	4,3	6,7	4,9	4,95
H13	2,5	2,7	2,7	5,4	3,7	1,9	5,4	2,1	2,1

8. Tableau 8: Les convections H (S2) pour les tôles déformés d'épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm)

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
H21	2,4	2,7	3,45	4	1,9	3,5	2,2	2,3	2,2
H22	5	6,9	6	6	3	6,2	4,6	4,9	4,7
H23	2,6	2,9	3,3	4,7	2,1	3,2	2,1	2,4	2,3

9. Tableau 9: Les convections H (S3) pour les tôles déformés d'épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm)

	Epaisseur 0.5mm			Epaisseur 0.7mm			Epaisseur 1mm		
	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
H31	4,5	3,8	4,4	4,9	4,7	4,1	4,1	3,1	3,1
H32	9,5	8,1	9,4	8,2	9	8	8,9	5,2	7,4
H33	4,6	4,1	4,7	5,7	4,3	3,9	4,2	2,9	3,4