

M/S 371. 625

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



**Projet de fin d'étude**

Présenté par : HANNACHI Ishak

Master

Option : Conception Et Production Industriel

=====

***Amincissement d'une tôle au cours d'une  
opération d'emboutissage***

=====

Sous la Direction de :

***Dr. Ellagoune Salah***

Année universitaire 2012/2013

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



« Pour atteindre les sommets il faut allonger ses veillées »>

من طلب العلى سهر الليالي

# Remerciements

---

# Remerciements

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Je remercie vivement Mr. Dr. **Dr Ellagoune Salah**, de m'avoir aidé par ses conseils précieux. Je le remercie également de son accompagnement tout au long de la rédaction de ce mémoire.*

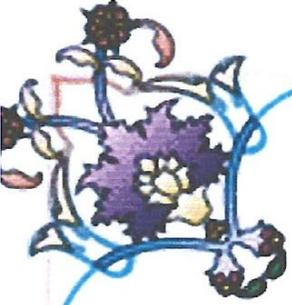
*Je remercie également les membres de jury de bien avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Je remercie toutes les personnes que je n'ai pas pu citer ici et qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et sans oublier :*

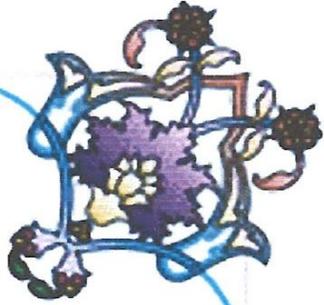
**Mr Chihaoui Salim.**

*Hannachi Ishak*

# Dédicace



# DÉDICACES



*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon père et ma mère qui ont fait moi l'homme que je suis, sa patienté et ses prières que dieu lui offre une longue vie, une bonne santé.*

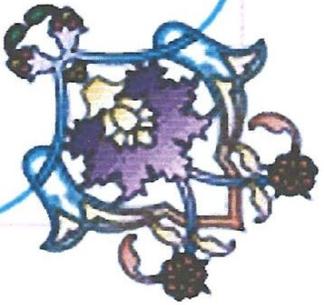
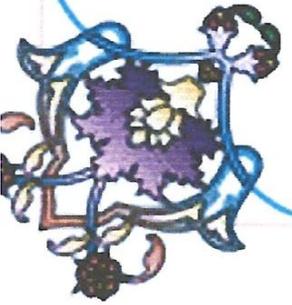
*A ma très chère sœur et mes très chers frères : CHICHEB ADIN et CHAMS ADIN.*

*A mes très chers nièces et neveux*

*A ma très chères amis BILEL , SLIMAN , ALHADI, SALIM , HICHEM , CHARIF , ABDOU ALLAH, FAICEL ...*

*A toute ma famille et mes amis*

ISHAK



# Sommaire

## *Sommaire*

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

### **Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>I.1.1.Emboutissage.....</b>	<b>03</b>
<b>I.1.2. Définitions.....</b>	<b>04</b>
<b>I.1.2.1.L'emboutissage en température.....</b>	<b>07</b>
<b>I.1.3.les essais spécifiques d'emboutissabilité .....</b>	<b>07</b>
<b>I.1.3.1.Essais élémentaires .....</b>	<b>07</b>
<b>I.1.3.2.Essais simulatifs .....</b>	<b>08</b>
<b>I.1.3.3.Essais expérimentaux .....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.4.Les critères d'emboutissabilité .....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.5.Influence de la structure des tôles .....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.5.1.Influence de la taille des grains .....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.5.2.Influence de la structure cristallographique.....</b>	<b>13</b>
<b>I.2. La Résolution du système d'équation et conditions explorées .....</b>	<b>30</b>
<b>I.3. Modélisation de l'emboutissage profond par éléments finis.....</b>	<b>32</b>
<b>I.3.1. Paramètres de la simulation.....</b>	<b>32</b>
<b>I.3.2. Les Résultats de la simulation numérique .....</b>	<b>33</b>

### **Chapitre II : Etude expérimentale**

<b>II.1. Caractéristiques mécaniques des tôles :.....</b>	<b>35</b>
<b>II.1.1. Matériaux utilisées :.....</b>	<b>35</b>
<b>II.1.2. Machine utilisé :.....</b>	<b>35</b>
<b>II.1.3. Extensomètre :.....</b>	<b>36</b>

II.1.4. Préparation des tôles :.....	37
II.2. Emboutissage :.....	37
II.2.1. Matériaux utilisé :.....	37
II.2.2 Machine d'emboutissage et dispositif :.....	37
II.2.3. Mesure de déformation :.....	39
II.2.3.1 Généralités :.....	39
II.2.3.2. Pont d'Extensomètre :.....	39
II.2.4. Le mesureur d'amincissement DM 4DL :.....	41
II.3. Préparation des tôles :.....	42
II.4. Manipulation :.....	42
II.5. Les courbes de traction :.....	43
II.6. Les essais de l'emboutissage :.....	49
II.7. Les dimensions de la tôle après déformation :.....	55
II.8. Les graphes charge & déplacement :.....	61
II.9. Courbe de déformation :.....	63

**Chapitre III : Simulation.**

III.1. Définition d'I-DEAS :.....	64
III.2. Type d'élément de maillage dans I-DEAS :.....	64
III.3. Les résultats de la simulation numérique :.....	65
III.4. Comparaison :.....	73
Conclusion :.....	74
Référence Bibliographique :.....	76

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

La tôle métallique (nue, revêtue, pré peinte, ...) sortant d'usine subit généralement une première transformation au cours d'une opération de mise en forme. Cette opération peut aller du simple pliage jusqu'à l'obtention d'une forme pouvant être très complexe selon différents procédés.

La technique de déformation des tôles la plus utilisée est l'emboutissage à froid, qui consiste à obtenir à partir de tôles planes prédécoupées (ou flans), une pièce dont la forme est constituée de surfaces non développables.

Cette pièce formée appelée 'embouti' doit conserver un bon état de surface et ne pas avoir de défauts de type amincissement localisé (appelé striction) ou ondulation (appelé plissement). Pour l'obtention de ces pièces, on utilise des outils d'emboutissage montés sous des presses mécaniques ou hydrauliques. Cette technique est utilisée dans tous les secteurs industriels : automobile, boîtes alimentaires, électroménager, ... et à un degré moindre dans l'aéronautique.

L'embouti n'est généralement pas la pièce finie utilisable, il n'est qu'une étape intermédiaire dans le processus de fabrication. Il est nécessaire après le formage, d'enlever la matière excédentaire qui a permis de maintenir l'embouti. Il est alors possible de réaliser des bords pour pouvoir accoster cette pièce avec d'autres et réaliser éventuellement une structure à partir de plusieurs pièces embouties.

L'emboutissage d'une tôle sera plus ou moins facile selon l'aptitude du matériau à subir des déformations plastiques. Plus un matériau est ductile, plus il sera facile de le mettre en forme par contre. Sa résistance mécanique pourra être insuffisante. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre la ductilité du matériau et sa résistance mécanique.

Les tôles métalliques utilisées en emboutissage présentent généralement de bonnes caractéristiques mécaniques et il est nécessaire de définir le processus de transformation adapté pour maintenir de bonnes propriétés sur le produit final.

Le but de ce travail est de mettre en valeur certains critères influant sur le processus d'emboutissage à travers une éprouvette simple (rectangulaire) et d'usage avec différents types d'épaisseurs:

- Entre autres l'épaisseur de la pièce pour valoriser l'amincissement de la tôle dans l'opération et voir les cas de son influence et ceci avec une tenue expérimentale en utilisant le contrôle non destructif avec la mesure ultrasonique de l'épaisseur de la paroi des pièces à l'aide du mesureur DM 4DL.
- Mesure de la déformation au centre de la partie entre le poinçon et le serre flan( Porte à faux).
- Mesure des différentes longueurs et sections (géométrie de la pièce), après emboutissage.
- Simulation numérique de l'essai d'emboutissage.
- Validation de la simulation par les résultats expérimentaux.

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## **I.1.Introduction :**

### **I.1.1.Emboutissage :**

Dans tous les domaines de l'industrie, la notion de mise en forme des matériaux intervient soit en amont, en aval ou en cours de production.

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 intervenant 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 y a 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'embouti 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 le contrôle de la planéité de la tôle et de son mouvement, distingue ce procédé du simple estampage. (**Fig.1**).

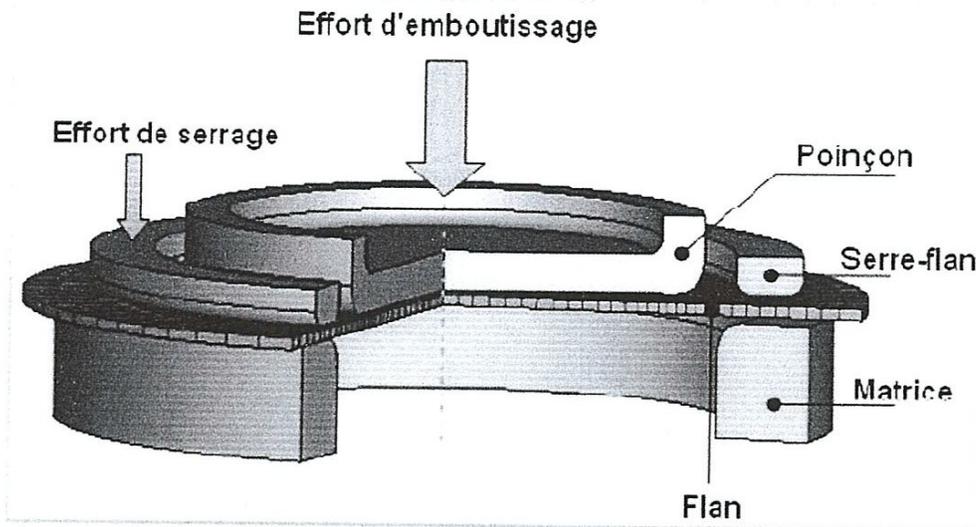


Fig.1 : les outils d'emboutissage [1].

### I.1.2. Définition :

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation à chaud ou à froid des métaux visant à transformer une tôle en une pièce plus ou moins creusée de surface non développable.

Ce mode de formage s'effectue sur une presse au moyen d'outillage adéquate dont la configuration détermine l'effet obtenu sur le flan :

\* **Outils à simple effet** : c'est la plus simple configuration, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon. (Fig.2 a).

\* **Outils à double effet** : comprend en plus de l'outil simple effet. Un serre-flan. (Fig.2 b).

L'outillage utilisé en emboutissage comprend donc :

- un poinçon : coulissant plus ou moins vite sur l'axe vertical, et déformant la tôle.
- une matrice : elle serre d'appuie la tôle et lui donne la forme extérieure finale au retour élastique près.
- un serre-flan : son rôle est de maintenir le flan lors d'une opération d'emboutissage. A fin d'assurer un écoulement homogène du métal et prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage.

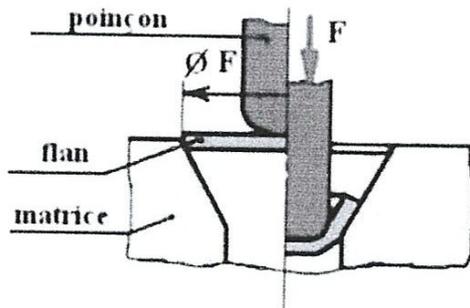


Fig.2 a : Outils à simple effet

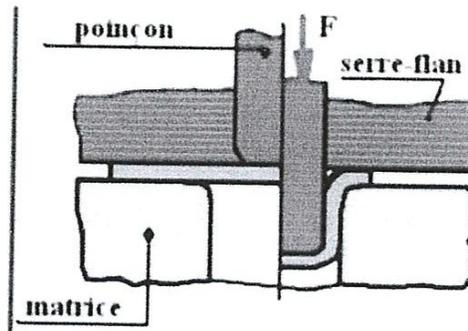


Fig.2 b : Outils à double effet

Fig.2 : Outillages d'emboutissage [1].

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

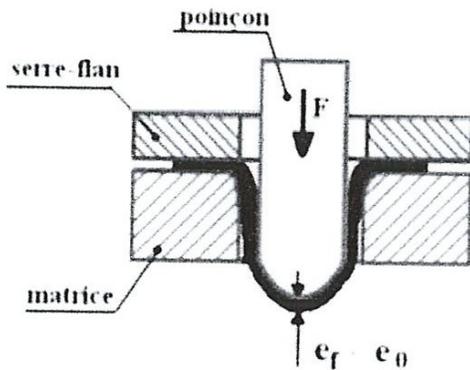


Fig.3 a : l'expansion.

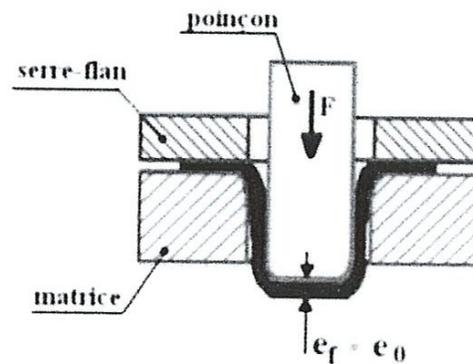


Fig.3 b : le retraits.

Fig.3 : Principaux types de déformation par emboutissage [1].

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

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

Il existe une infinité d'autres modes dépendant principalement de l'importance du glissement de la tôle sous le serre-flan, par exemple, dans le cas de l'emboutissage d'une pièce cylindrique à fond plat, illustrée par la (Fig.4). On voit apparaître

l'expansion et le retrait ainsi que l'évolution de différents modes de déformation le long de la pièce emboutie.

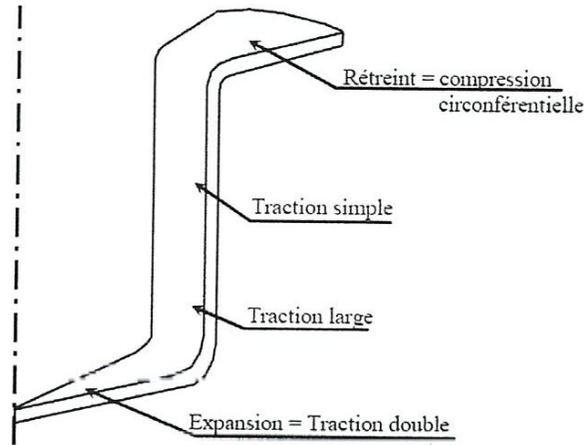


Fig.4 : Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de révolution [2].

Afin d'identifier et de mesurer ces différentes zones de déformation, on crée un motif sur la pièce. La déformation de la pièce est déduite de la déformation du motif. Ces motifs se présentent sous la forme de cercles ou de carrés qui sont déposés sur la surface ou bien encore d'un mouchetis aléatoire ces différentes déformations sont représentées sur la (Fig.5).

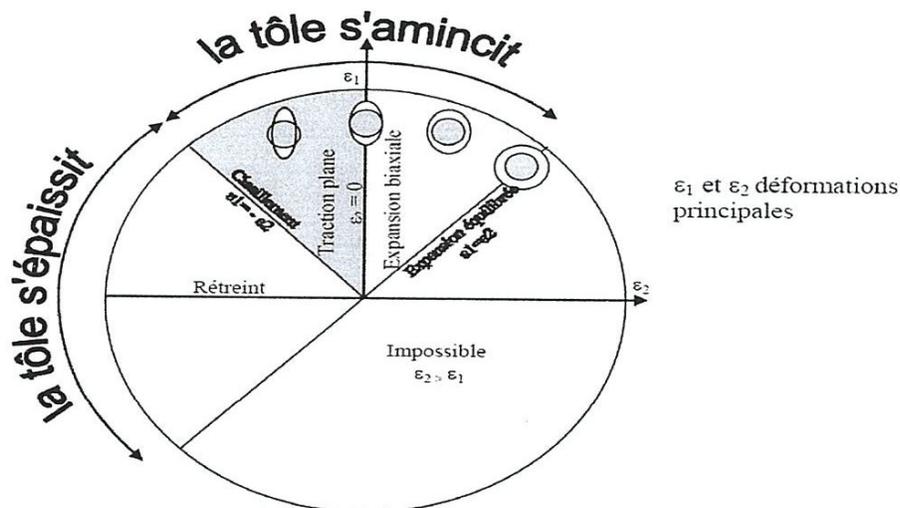


Fig.5 : Diagramme des types de déformation [2].

Ce diagramme illustre les différents types de déformation qu'il est possible de rencontrer lors d'une opération d'emboutissage. Selon les conjugaisons de

déformation. Soit la zone de la pièce concernée s'épaissit (cas de retreint) soit elle s'amincit.

#### **I.1.2.1.L'emboutissage en température :**

Il existe deux techniques d'emboutissage en température :

- **L'emboutissage à froid :**

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

- **L'emboutissage à chaud :**

Principalement utilisé sur presses hydrauliques simple 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 finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement [2].

#### **I.1.3.Les essais spécifiques d'emboutissabilité :**

De nombreux essais spécifiques ont été imaginés et utilisés pour juger l'aptitude d'une tôle à subir l'opération d'emboutissage. Nous les avons classés selon le mode de déformation prédominant. On distingue trois catégories d'essais d'emboutissage.

##### **I.1.3.1.Essais élémentaires :**

Dans cette catégorie on classe les essais des tôles qui font appel à la sollicitation simple (traction uniaxiale traction biaxiale expansion, traction compression retreinte) permettant de déterminer les propriétés mécaniques des tôles ( $R_m$ ,  $R_p$ ,  $A\%$ ) on peut, également, obtenir à partir de ces essais de traction des informations complémentaires sur les caractéristiques intrinsèques du matériau comme le coefficient d'écrouissage  $n$  et le coefficient d'anisotropie  $r$ .

### I.1.3.2. Essais simulatifs :

Ces essais ont pour but de mesurer la capacité de la tôle à former un embouti de forme simple en se rapportant aux principaux modes de déformation et à leur combinaison (expansion et retrait).

#### a) Essais d'expansion :

On distingue deux catégories d'essais d'expansion ou de traction biaxiale.

- Essais d'expansion par gonflement :

Ces essais s'effectuent, sans frottement, par gonflement sous l'effet d'une pression hydraulique d'un flan bloqué sur une matrice ouverte (essai Jovignot ou bulge tests) (Fig.6) Dans ces essais, on mesure en général la hauteur maximale  $h_m$  de l'embouti lors de l'apparition de la rupture, ainsi que la pression maximale d'emboutissage.

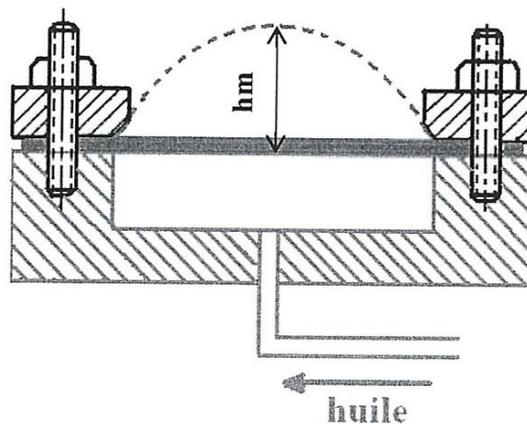


Fig.6 : Essai Jovignot ou bulge tests [3].

- Essais d'expansion sur poinçon :

Ces essais s'effectuent, avec frottement de la tôle sur un poinçon de forme hémisphérique ou ellipsoïde qui s'enfonce dans un flan bloqué sur une matrice ouverte.

#### b) Essais de rétreint :

Ces essais permettent de bien juger l'aptitude du métal à se déformer par rétreinte. Les essais les plus utilisés sont :

- Essais de rétreint sur poinçon à fond plat (essai SWIFT) (Fig.7).

Pour cet essai on utilise un échantillon circulaire dont les diamètres sont échelonnés de 0,25 à 0,25. Les dimensions des outils dépendent de l'épaisseur de la tôle à essayer. En augmentant progressivement le diamètre du flan, on obtient un godet de plus en plus profond. Jusqu'au moment où le godet casse en cours d'emboutissage. Ce qui donne le diamètre critique du flan pour un outillage donné. Le rapport du diamètre du flan  $D_m$  au diamètre du poinçon  $d_p$  est le rapport limite d'emboutissage.

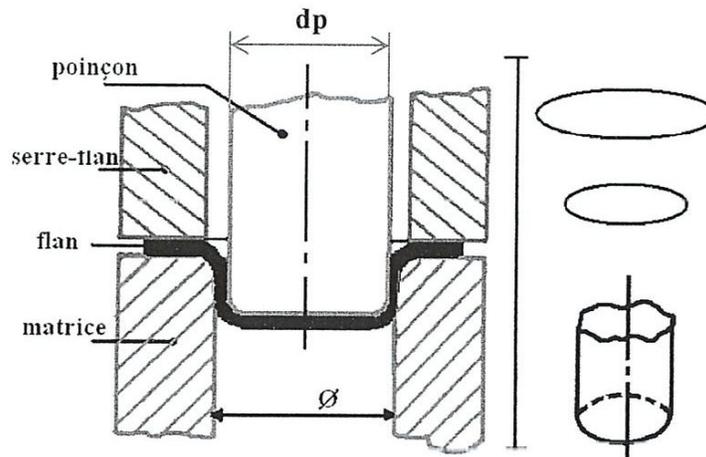


Fig.7 : Essai de Swift [3].

### c) Essais mixtes:

Cette catégorie est la plus utilisée, puisque la plupart des essais simulatifs proposés pour juger l'aptitude des tôles à s'emboutir fait intervenir simultanément ou successivement les différents modes de déformation. Les principaux sont les suivants :

- Essais de coupelle conique Fukui :

L'essai Fukui qui est rarement utilisé de nos jours, surtout en raison de la difficulté d'usinage des éprouvettes. Un flan circulaire est embouti par un poinçon hémisphérique pénétrant dans une matrice à entré conique ce type d'essai fait intervenir les deux modes de déformation que sont l'expansion sous le nez du poinçon et le rétreint sur la partie conique de la matrice. La rupture se produit ici par expansion.

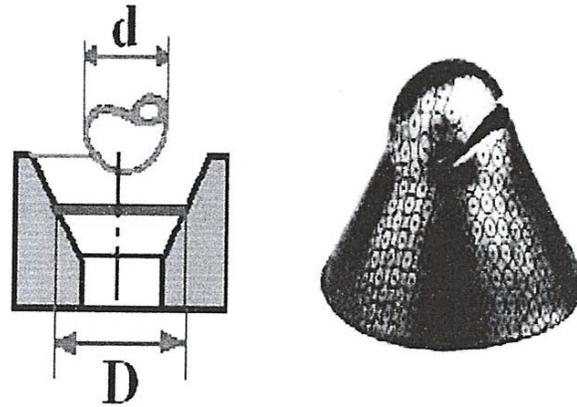


Fig.8 : Essai FUKUI [3].

- Essai d'expansion d'un trou K W I.

Cet essai consiste à emboutir une coupelle avec un poinçon cylindrique à fond plat muni d'un ergot de centrage dans un flan bloqué sur la matrice et percé d'un trou. Les dimensions des outillages dépendent de l'épaisseur des tôles essayer (**Tableau.1**).

**Tableau.1** : Dimension de l'outillage pour l'essai KWI

Epaisseur de la tôle (mm)	*e<1	1<e<2	2<e<3
Poinçon : diamètre $d_p$ Rayon $r_p$	25 3	40 5	55 7
Matrice : diamètre $d_m$ Rayon $r_m$	27 0.5	44 1	61 1.5
Serre-flan : diamètre $d_h$	25+e	40+e	55+e
Diamètre du trou de l'éprouvette $D_0$	7.5	12	16.5

- Les éprouvettes de forme carré ou ronde de diamètre 60 à 80 mm.
- Le flan est bloqué sur la matrice par un effort de 1000 daN.
- Le poinçon est lubrifié.

On arrête l'essai lorsque la première amorce de fissure apparaît au bord du trou central et on mesure l'allongement Circonférentiel  $A_c\%$  du bord du trou  $A_c\% = \frac{(D_f - D_0)}{D_0} \cdot 100$  avec  $D_0$  et  $D_f$  diamètres du trou respectivement à l'état initial et l'état final.

### **I.1.3.3.Essais expérimentaux :**

Ces essais cherchent à reproduire les opérations industrielles d'emboutissage en mettant en jeu les différents paramètres opératoires. Ces emboutis sont généralement de forme simple mais de dimensions nettement supérieures à celles des essais simulatifs (boîtiers, carters, bacs,...). Ils sont emboutis sur des presses industrielles dans des conditions suffisamment précises pour permettre des mesures de laboratoire (mesure des déformations, des efforts des profondeurs, etc. .).

### **I.1.4.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 uni axiale.

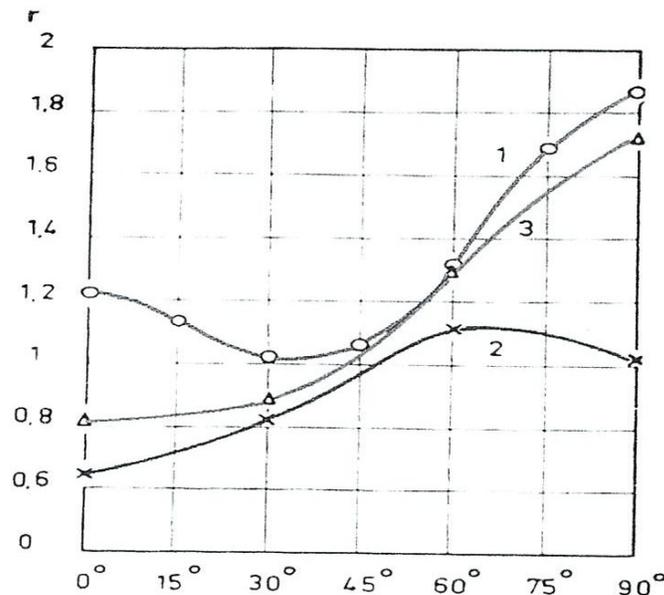


Fig.9 : Variation de  $r$  en fonction du sens de laminage [3].

La figure ci-dessus (**Fig.9**) montre la variation du coefficient d'anisotropie  $r$  dans le flan de la tôle avec la valeur de l'angle  $\phi$  entre la direction d'un essai de traction et le sens du laminage. Ces courbes représentent les 3 cas possibles dans le cas d'un acier extra doux pour emboutissage. Ce coefficient, si elle est élevée, indiquerait donc une forte résistance à l'amincissement de la tôle et une grande capacité à la déformation avant la striction.

### I.1.5. Influence de la structure des tôles

Les tôles minces sont des agrégats poly cristallins. Leur emboutissabilité, de même que l'ensemble de leurs caractéristiques, dépend pour une grande part de ces agrégats.

#### I.1.5.1. Influence de la taille des grains :

La taille des grains est l'un des paramètres les plus importants, en effet elle agit sur la limite d'élasticité et la résistance à la traction qui sont des critères (conventionnels) de l'emboutissabilité. Ainsi, plus la taille des grains n'est importante, l'emboutissabilité de la tôle sera meilleur. Il faut cependant noter que si les grains sont trop importants, un défaut de surface apparaît. Il est appelé « peau d'orange » et se caractérise par une surface floue et onduleuse.

### I.1.5.2. Influence de la structure cristallographique :

L'orientation cristallographique est un paramètre non négligeable. Il intervient non seulement au niveau du coefficient d'écroutissage mais également sur les caractéristiques  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A\%$ ... L'écroutissage de la tôle survenant lors d'un recuit ou d'un laminage, est responsable de l'orientation cristallographique des grains et donc des directions préférentielles de traction ou autres essais similaires.

Le retour élastique :

Lorsque le poinçon se retire après la phase de mise en forme, la pièce ainsi formée n'est plus soumise à la force de maintien. Il se produit alors un retrait de la matière dû à la déformation **élastique** du flan primitif et résultant de contraintes résiduelles après formage. On parle alors de retour élastique (**Fig.10**).

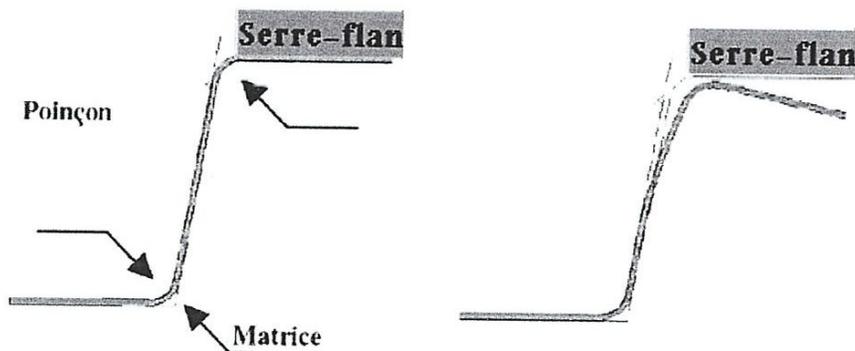


Fig.10 : Retour élastique [3].

Afin d'obtenir une pièce de dimensions conformes aux attentes, il est donc important de prendre en considération ce phénomène. Afin d'atténuer ce phénomène, il est courant de recourir à certains artifices tels que la frappe du rayon, l'étirage en fin de gamme ou le maintien prolongé du poinçon. Il faut ajouter que ce phénomène est d'autant plus important que la limite élastique du matériau est-elle même élevée (cas des aciers inoxydables par rapport aux aciers doux) [3].

**Tze-Chi Hsu et Chan-Hung Chu [4]** ont élaboré une méthode numérique que basée sur la théorie de membrane pour l'analyse des processus axisymétriques de formation des feuilles de métal comme l'étirage de poinçon, le schéma profond et l'hydroformage est présenté. L'approche finie d'élément d'élastique-plastique est basée sur la règle d'écoulement liée au critère quadratique du rendement de la colline pour le matériel anisotrope. Toute la formulation lagrangienne et la théorie virtuelle du travail sont employées pour dériver les équations de rigidité et le rapport entre le déplacement et la contrainte. Quelques exemples sur l'étirage, le dessin et l'hydroformage des feuillards sont considérés, et les résultats calculés sont comparés aux données expérimentales et aux résultats des solutions numériques existantes.

Ce modèle axisymétrique de membrane d'un infini-élément élasto-plastique pour l'analyse du métal de feuille formant des processus a été développé. Le problème non linéaire a pris en considération les changements de la géométrie, les propriétés matérielles et les conditions de contact pendant le temps font un pas. Les résultats présentés dans cet article que la méthode informatique peut être appliquée avec succès à de divers processus tels que l'étirage, le dessin et l'hydroformage qui seront utiles pour déterminer le rapport et le formabilité de dessin de la feuille.

**Dejmal et J. Tirosh et A. Shirizly et L. Rubinsky [5]** présentent une tentative d'augmenter le rapport de dessin de limite des processus de dessin profonds par la recherche de la courbure optimale de la matrice, ce qui réduit au minimum la charge de dessin. La recherche faite ici pour une courbure optimale de matrice est basée sur des observations expérimentales et suivie d'une analyse détaillée de limite supérieure. L'analyse tient compte du caractère non-régulier du processus (d'un 2d blanc plat circulaire dans une tasse 3d axisymétrique). L'écoulement plastique le long de la courbure de matrice est exprimé en système du même rang toroïdal qui apparemment décrit plus naturellement un champ doux de vitesse le long du vrai profil toroïdal de la

matrice. Les résultats fournissent plus étroitement le rapport entre le taux de dissipation d'énergie et la courbure de matrice de sorte qu'une courbure préférée de matrice soit procurable par minimisation d'énergie.

Des blancs circulaires de feuille, faits à partir de l'aluminium et du cuivre, ont été dessinés par des matrices avec différents rayons de courbure (avec au moins cinq répétitions pour chaque rayon) pour capturer les dispositifs des matrices optimales toutes les fois que existe.

Le résultat principal est que dans certaines circonstances qu'une courbe optimale de matrice existe. Il dépend en grande partie du rapport de dessin et du frottement dièdre de blanc/ matrice,  $m$ , mais semble tout à fait peu sensible à l'épaisseur initiale des flans. La courbure optimale de matrice est prononcée dans les caisses où la résistance de friction est relativement basse, autrement elle est indistinctable et demeure pratiquement indéterminable par des concepteurs.

**Mark Colgan et John Monaghan [6]** fait part des étapes initiales d'une analyse expérimentale et finie combinée d'élément (FEA) d'un processus de dessin profond. L'objectif de cette recherche est de déterminer les facteurs les plus importants influençant un processus de dessin, utilisant l'aide d'une conception des expériences et de l'analyse statistique. Les paramètres changés incluent le poinçon et meurent des rayons, la vitesse de poinçon, maintenant la profondeur de force, de frottement et d'aspiration. Une installation de dessin profonde a été conçue et construite à cette fin. Les poinçons et les matrices de diverses géométries étaient manufacturés. Du travail précédent de FEA et du travail expérimental effectué jusqu'ici, il semble que les rayons de poinçon / matrice ont le plus grand effet sur l'épaisseur des tasses déformées d'acier doux comparées à la force ou au frottement de blanc-support. Plus est les rayons de punch/die petits, plus est la force de poinçon grande et plus courte est l'aspiration finale. On l'a observé également du travail jusqu'ici que la vitesse des jeux de dessin

un rôle intéressant, pour autant que, plus est haute la vitesse plus est l'aspiration autre, qui n'est pas entièrement comme prévue. La cause de ceci plus loin sera étudiée. Si la force de blanc-support n'est pas gardée dans la limite supérieure et inférieure de la gamme raisonnable qu'elle a un effet significatif sur la profondeur de l'aspiration, avec le poinçon déchirant par le fond de la tasse si la force est trop haute et si rider trop bas du secteur de bride se produit.

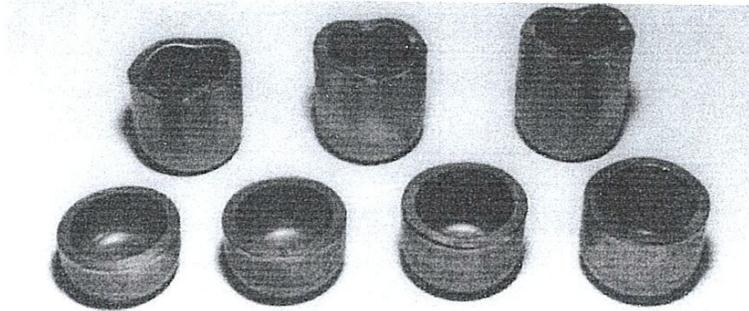
Les tasses recuites montrent une différence définie aux blancs originaux en termes de caractéristiques de dessin, augmentant la profondeur de l'aspiration et de réduire boucle sur la bride.

Les résultats préliminaires donnés par le FEA sont bons, donnant l'exactitude raisonnable pour l'épaisseur et la force de poinçon. Rider de la tasse car il s'approche 20 millimètres est un problème qui n'est pas produit réellement dans le travail expérimental. Des effets anisotropes sur la bride peuvent être prévus. Plus de travail devra être effectué pour raffiner le modèle et essayer de mesurer des valeurs de frottement pour le poinçon dégrossissez et mourez le côté du blanc.

**Z. Kampus et K. Kuzmann** traitent [7] de l'analyse de l'emboutissage profond sans serre-flan avec un accent particulier sur la géométrie de la pièce. Le processus a été simulé par le FEM aide d'un modèle en plastique rigide. En raison d'une vitesse relativement faible de formage (une presse hydraulique est normalement utilisée) et de petites déformations, la température n'a pas été considérée dans le modèle. Dans l'analyse axisymétrique des éléments quadratiques ont été utilisés. Le modèle a également été vérifié expérimentalement.

Ainsi l'opération d'emboutissage sans serre-flan, qui est principalement utilisé pour le métal en feuille épaisse mince, a un certain nombre d'avantages par rapport à la procédure d'emboutissage conventionnel: les forces de formage

sont plus faibles, les outils et les machines-outils pour le métal formant sont simples et le rapport d'étirage obtenu peut être supérieur à 2,8 (**Fig. 11**).



**Fig. 11** : Cuvettes formées par emboutissage de tôle d'épaisseur. Dessin ratios de  $\beta_0 = 2$  à  $\beta_0 = 2,87$ , par rapport poinçon de diamètre  $d_p / s_0 = 8$ . Matériel Haute - Acier alliés  $\check{C} = 4580$  (UNS 30403).

Le dessin des ratios de cette taille des changements considérables dans l'épaisseur de paroi se produire. Ainsi la contrainte vraie du mur sur le bord ou à la transition du fond dans le mur peut être  $|\varphi_n| > 0,3$ .

La connaissance de la géométrie, particulièrement celle de l'épaisseur de paroi de tasse est importante pour détermination des paramètres réels de la géométrie qui sont nécessaires pour la planification réussie de former des opérations comme le schéma renversé, de refaire, de les repasser et de différentes opérations de découpage (tournage, rectifiant).

Les changements de l'épaisseur dans l'emboutissage profond sans serre-flan étaient dans une plus large mesure. En utilisant la théorie des grandes déformations, il a montré que l'épaisseur maximum sur le bord de tasse à la fin de l'opération dépend du rapport de dessin  $B_0$  et du coefficient  $\lambda$ :

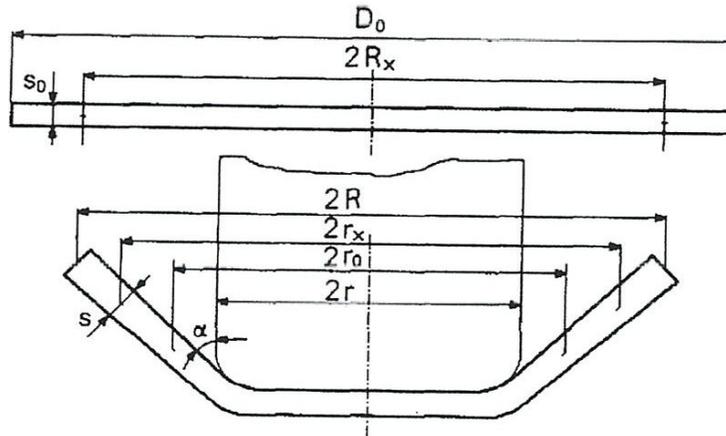
$$S_{\max} = S_0 \cdot \beta_0^\lambda \quad (1)$$

Dans l'emboutissage profond avec des serre-flan, coefficient,  $\lambda$  a une valeur constante de 0,5 alors que dans d'emboutissage sans serre-flan, il est dépendant aussi du rapport  $S_{\max} / r_0$  et est,  $\lambda < 0,5$ .

Basé sur un algorithme pour le calcul de déformation de la paroi a été défini pour n'importe quel endroit au cours de dessin (**Fig.12**):

$$\int_{s_0}^s \frac{ds}{s} = \int_{R_x}^{rx} \frac{2(A-1) \cos \alpha \cdot s + r}{r(A-2) - (A-1) \cos \alpha \cdot s} \cdot \frac{dr}{r} \quad (2)$$

$$\text{Où } A = \left( \frac{\tan \alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right]$$



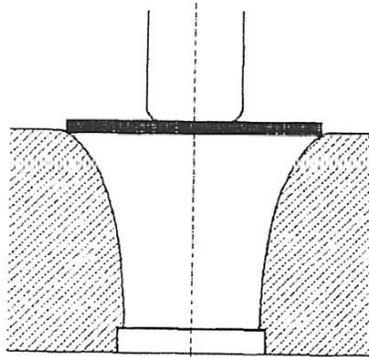
**Fig.12** : Paramètres de la géométrie dans l'emboutissage profond.

Il a été prouvé par des expériences que l'équation (2) décrit avec une précision suffisante le changement d'épaisseur de paroi tasse près du bord, mais il ne peut pas être utilisé pour calculer la réduction au fond de tasse ou au e. g. pour calculer la géométrie entière de la tasse.

On le sait que dans l'emboutissage sans serre-flan le diamètre extérieur de tasse est approximativement égal au diamètre de la matrice tandis que le diamètre intérieur change le long de la taille en ce qui concerne l'épaisseur de paroi et dépend des conditions de formation et des paramètres géométriques de l'ébauche et l'outil. Pour une détermination précise de la géométrie tasse, il est

nécessaire de procéder à une simulation numérique de l'emboutissage par éléments finis.

Une simulation de l'emboutissage par FEM sans serre-flan a été simulée par le programme ABAQUS. Le flan est divisé en éléments quadratiques avec quatre points d'intégration tandis que pour le poinçon et la matrice des éléments rigides ont été choisis en raison des faibles pressions spécifiques et la rigidité de l'outil. La matrice a eu une forme tractrice (**Fig.13**).



Diamètre d'ébauche:  $D_0 = 105$  mm.  
 Epaisseur de tôle:  $s_0 = 5$  mm.  
 Matière de la pièce: Č.1121 5(UNS G10150).  
 Courbe d'écoulement:  $\sigma_f = C \cdot \varphi^n$ .  
 Constant:  $C = 500$  N/mm<sup>2</sup>.  
 Contrainte - durcissement coefficient:  $n = 0,24$ .  
 Diamètre de poinçon:  $d_p = 40$  mm.

**Fig.13** : Modèle et les données pour la simulation de l'emboutissage profond sans serre-flan.

La matrice d'emboutissage avec la forme de tractrice:

$$y = h \ln \frac{\sqrt{h^2 + y^2}}{y} - \sqrt{h^2 - y^2}$$

La simulation d'emboutissage a été faite dans un certain nombre d'étapes.

À une course relative de poinçon.

$$H_{r1} = \frac{H_p}{H_c} = 0.46.$$

Où

$H_p$  - course instantanée de poinçon

$H_c$  - course totale de poinçon

La simulation a été interrompue et la contrainte de la pièce soulagée (**Fig.14** a, b, c, d et e) représentent les contraintes et la déformation plastique de cette phase d'étirage. La simulation de l'emboutissage a été interrompue encore à la fin de l'opération mais encore avec la pièce à usiner dans la matrice. Dans cette phase,

les contraintes tangentielles de compression qui sont le long de la circonférence de la tasse, sont les plus élevés (Fig. 15). Quand la pièce n'était plus maintenu par la matrice, son diamètre est agrandi en raison de la détente, et les contraintes tangentielles sur le bord changé la direction de la compression à la traction (Fig. 16). Ces contraintes de traction peuvent ensuite provoquer une défaillance bord de tasse.

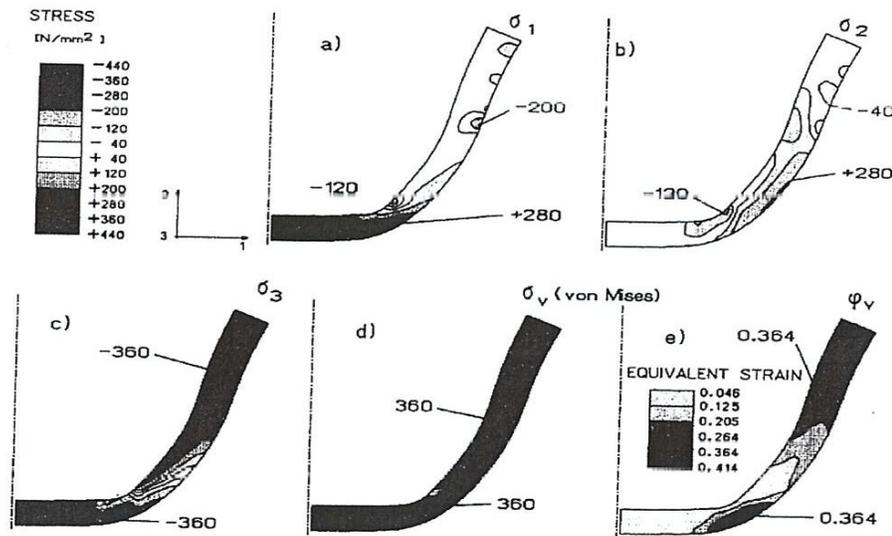


Fig.14: Efforts et déformation en plastique pendant le dessin à la course relative de poinçon

$$H_r = 0,46$$

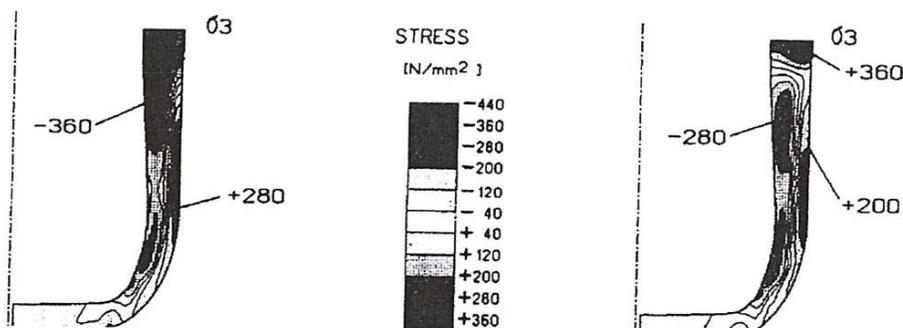


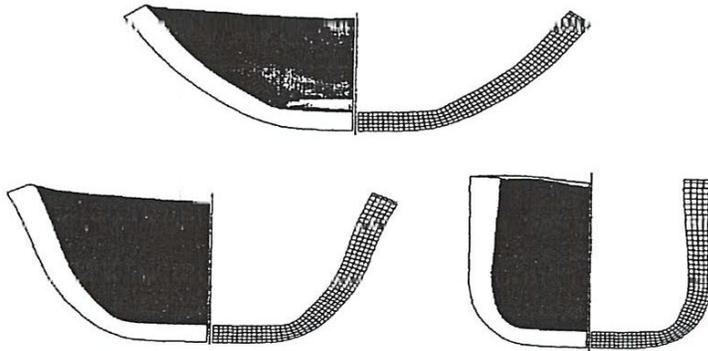
Fig.15 : contraintes tangentielles à la fin de l'opération (bord toujours de tasse dans la matrice).

Fig.16: contraintes tangentiels après la détente.

La vérification du modèle par des expériences pour la vérification du modèle d'ordinateur a été réalisée sur un outil spécial sur une presse hydraulique. Pour

comparer la forme intermédiaire entre la simulation obtenue par les étapes, les expériences ont été interrompues deux fois.

La comparaison a démontré que les déviations de la géométrie sont minimales (**Fig.17**). Le diamètre extérieur est de tasse dans les deux cas pratiquement identique (la déformation élastique obtenue par simulation et  $\Delta D = 0,16$  mm et la déformation mesurée de 0,1 à 0,2 mm). La hauteur de tasse calculée est inférieure à 5% fois la hauteur moyenne mesurée, tandis que l'épaisseur de tasse simulé dévie de l'épaisseur moyenne mesurée à certains endroits seulement de quelques dixièmes de millimètre.



**Fig.17** : Le réel contre la géométrie simulée de tasse.

Dans la pratique industrielle, l'ingénieur est principalement intéressé par la géométrie ou l'épaisseur de paroi de tasse sur le bord à la fin de l'opération d'emboutissage. Afin de vérifier les modèles théoriques, des tasses avec des ratios de dessin  $\beta_0 = 2,25, 2,375, 2,5$  et  $2,625$  ont été formés. Que la déformation exacte ne peut être calculée que par la méthode des éléments finis procédé du calcul selon l'équation (1) étant précise seulement dans le rapport d'emboutissage  $\beta_0 = 2,1$ , et conformément à l'équation (2) seulement à plus grand rapport de dessin.

Considérant la théorie de l'emboutissage profond avec serre-flan, l'épaississement de la paroi sur le bord de tasse dépend aussi du paramètre

d'anisotropie plastique  $r$ , où le rapport de déformation est déterminée à partir de l'essai de traction uniaxiale  $[\sigma]$ :

**Tableau 1:** Formation des propriétés des matériaux examinés

Matériel	courbe d'écoulement	paramètre en plastique $r$ d'anisotropie
AlMg3	$\sigma_f = 376.6 \cdot \varphi^{0.23}$	0.69
Č.1221	$\sigma_f = 690 \cdot \varphi^{0.25}$	0.85
Č.4580	$\sigma_f = 348 + 1831 \cdot \varphi$	0.90

$$s_{\max} = s_0 \cdot \beta_0^f \quad (3)$$

Où  $f = \frac{1}{1+r}$

Avec un paramètre d'anisotropie plastique croissant, la déformation de la paroi selon l'équation (3) diminue.

L'épaississement de la paroi dépend aussi de matériau durcissant. Avec une pression croissante durcissement coefficient  $n$  (fort durcissement) de la déformation du bord augmente aussi.

Les essais ont été répétés sur deux autres matériaux ayant différents paramètre anisotrope en matière plastique  $r$  et différents coefficients d'écrouissage  $n$ . Bien que Č. 0,4580 (UNS S30403) à une supérieure anisotropie en matière plastique paramètre  $r$ , les effets du fort durcissement étaient plus élevés, résultant en petites déformations de l'épaisseur de paroi avec les deux autres matériaux.

Par des expériences ils ont démontré qu'on peut établir que, si le programme convient, la simulation de FEM du schéma profond sans support blanc peut avec succès calculer tous les paramètres de la géométrie du morceau de travail dans n'importe quelle phase de l'opération de dessin. Établissant un modèle avec éléments axisymétriques est adapté seulement aux matériaux dont le facteur de l'anisotropie planaire  $r_p \approx 1$ . Jusqu'à un plus petit degré, la géométrie de la

tasse dépend également des propriétés de formation du matériel. Pour les matériaux qui dans différentes directions montrent différentes propriétés de formation, la détermination précise de la géométrie de tasse exigera la considération de la théorie de la plasticité de la colline. Il sera nécessaire d'employer les éléments 3d. De cette façon nous pourrions également déterminer la limite de processus prenant pendant que les occurrences de fente de critère sur la tasse affilent.

**S. Natarajana et S. Venkataswamyb et P. Ragavathiperumula [8]** traitent de l'analyse de l'emboutissage des flans circulaires en axisymétriques tasses cylindriques en utilisant la modélisation numérique dans des conditions différentes de tirage. Un programme d'éléments finis pour simuler les composants de processus et d'analyse axisymétriques est développé. Un modèle en matière plastique rigide avec l'approche variationnelle est utilisé dans l'analyse par éléments finis. Le montant de tirer pouvant être obtenu dans le procédé d'étirage est lié théoriquement et expérimentalement avec la diamètre initial de l'ébauche. Les tensions de surface dans la direction radiale et circonférentielle ont été calculées et mesurées.

Malgré le fait que métal de feuille formant des technologies sont intensivement employés dans l'industrie moderne, l'outillage et le procédé de production est en grande partie basé toujours sur empirique résultats. Le développement de la simulation numérique détermine, les possibilités d'une évaluation objective de formabilité, la distribution de contrainte à différentes étapes d'aspiration et la possibilité de réduction emboutissant des épreuves pendant processus d'évaluation. Analyse théorique du schéma profond des tasses a été rapporté la première fois par Hessenberg et Danckert a étudié l'effet de l'effort résiduel dans le schéma profond des tasses cylindrique par le processus modelant le profil de matrice. Les résultats de la variation paramétrique de la numérique simulation par Kobayashi et collègues comparés

raisonnablement bien avec le travail expérimental de rapide et Chung Yamada et Oshimura plasticité présentée matrices avec le modèle élasto-plastique pour analyser la tasse schéma. La simulation de processus est basée sur un modèle rigide de matière plastique est considéré et a l'algorithme fini tout usage d'élément est développé pour l'analyse de la tasse hémisphérique dessinant avec l'aluminium Matériel de la catégorie 1100-O. La formulation finie d'élément est basé sur le principe variationnel avec la pénalité approche de fonction. La formulation tient compte des états de frottement de contact. Une installation générale pour usiner pour l'analyse du schéma de tasse est montrée dans (Fig.18).

Quatre nœuds, des éléments bidimensionnels et iso-paramétriques sont employés dans modeler. Le calcul par accroissement avec la géométrie la mise à jour est employée pour simuler le glissement de la feuille au-dessus du mourez la confirmation extéricure à la forme de l'outil. Le programme se compose traiter, prétraiter et traiter de poteau segments. Données simples de points clés concernant la géométrie du poinçon, la matrice, le support blanc et le métal de feuille sont donné. Le nombre requis d'éléments à trois zones de feuille notamment: (i) matériel sous le poinçon; (ii) zone matérielle sans tout contact initial avec l'outil; (iii) le matériel entre la matrice et le support blanc doivent être mentionnés. Ceci aide à créer une maille pendant la discrétisation finie d'élément. Le profil de la géométrie d'outil est développé par l'arc et la ligne avec les points clés prescrits, qui permettront la détermination des nœuds qui ont le contact initial avec l'outil. La vitesse du poinçon est appliquée si les nœuds sont en contact avec le poinçon. On permet au le matériel sous le support blanc de se déplacer au-dessus de la matrice dans le processus de dessin. L'état de frontière de friction est appliqué pour les nœuds entrant en contact avec l'outil. Les données d'entrée incluent les propriétés matérielles, incrément de temps, usinez la géométrie, endroits principaux, vitesse de poinçon, nodale coordonne et des états de frontière. Le programme simule la distribution de

contrainte à différents états d'aspiration La contrainte dans l'épaisseur se compare favorablement bien dans la bride de partie de la tasse avec les données de marquage banc rapporté par Kobayashi et Alton.

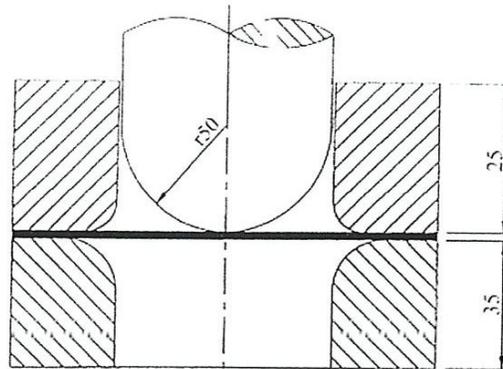


Fig.18 : Configuration hémisphérique de poinçon.

Pour la validation expérimentale l'épaisseur de catégorie de l'aluminium 1100-o de qualité d'aspiration 0,8 millimètres a été masquée dehors et l'uniformité de l'épaisseur blanche et planéité ont été testés. L'expérience a été effectuée sur une pression hydraulique de double action après la normalisation des limites d'enfoncer des variables de pression. Un rapport d'aspiration de 2 a été considéré pour tout le dessin, maintenant une force se tenant constante pour tout l'ensemble de dessin. Les blancs d'essai étaient photo-quadrillés avec des cercles de grille de 2,5 millimètres de diamètre et inspectée pour assurer l'uniformité du modèle de grille (Fig.19). La déformation de la grille mesurée après que chaque aspiration simple d'étape ait fourni des moyens pour évaluer la contrainte (Fig.20).

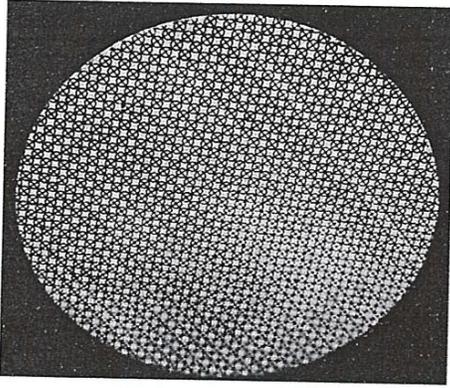


Fig.19 : Blanc d'essai de Photo-quadrillé

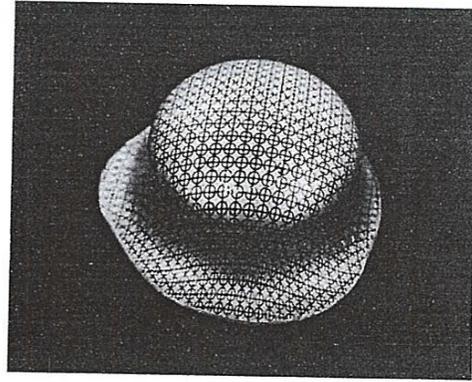


Fig.20 : Vue de tasse hémisphérique avec l'inscription de grille.

Pour ce qui est des résultats, l'algorithme utilisé en développant le programme des éléments finis de feu laisse visualiser les zones de déformation à différentes étapes d'aspiration. Le programme évalue également la contrainte pour les différentes étapes de l'aspiration.

La contrainte le long de l'épaisseur est positivée près de la partie formant bride de la tasse indiquant l'épaississement du matériel sous serre-flan et de la bride de filière. L'amincissement est plus prononcé près de l'enveloppe de poinçon à la condition de pleine allonge. La répartition des contraintes épaisseur indique la zone de rupture, ce qui est autour du rayon du poinçon. Les résultats simulés comparent raisonnablement bien avec le travail expérimental avec une erreur environ 8%.

La déformation radiale indique l'effet d'amincissement de la feuille métal lors tasse formation. L'étirement est plus les éléments intérieur et moins dans les éléments extérieurs de matrice entrée serre-flan. Que le poinçon se déplace vers le bas, la déformation maximale vers l'extérieur radial est de décalage indiquant le tracé de la coupe et la contrainte radiale moindre dans les éléments extérieurs indiquent l'épaississement de la bride.

La contrainte circulaire maximum se produit près de l'angle de matrice. La contrainte circulaire est négligeable au fond de la tasse indiquant l'écoulement en métal ayant pour résultat formation de tasse. La distribution de contrainte prévue par la méthode des éléments finis en matière plastique rigide montre la

bonne concordance avec les résultats expérimentaux au-dessus de la partie de bride de la tasse.

Les conclusions suivantes ont pu être faites baser sur la recherche ci-dessus :

- (i) La formulation finie en plastique rigide d'élément donne distribution de contrainte sans compromettre la numérique efficacité et exactitude.
- (ii) La simulation laisse essayer différentes solutions pour la fabrication du produit et du processus peut soyez optimisé. Le choix du processus optimum peut être fait d'une façon objective avec l'appui numérique les données et réduisent les épreuves inutiles.
- (iii) Peu de contrainte radiale dans les éléments externes indiquent épaissement de la bride.
- (iv) La contrainte d'épaisseur compare raisonnablement bien à partie de bride de la tasse avec les résultats expérimentaux.

**G. Payena,b et E. Feldera [9]** ont étudié l'emboutissage ou le flan subit une expansion sous le poinçon et un rétreint sous le serre-flan. Du fait des variations d'épaisseur, le contact se concentre près de la périphérie du flan. Ce phénomène est analysé en emboutissage profond avec un modèle analytique (métal RPP avec anisotropie normale, frottement de Coulomb). Les résultats sont comparés à des résultats de simulation par éléments finis précisant l'impact de l'élasticité, de la loi d'écroutissage du métal et du frottement sous le poinçon.

Dans l'Approche analytique, Des hypothèses principales et mise en équation on utilise le système de coordonnées cylindriques. La tôle vérifie le critère anisotrope de Hill 48 et possède une anisotropie normale de coefficient de Lankford  $R$ . Son élasticité est négligée ; sa contrainte d'écoulement, supposée uniforme et constante, est notée  $\sigma_0$ . On note  $\sigma_{0b}$  la contrainte de biextension plastique dans le plan de la tôle. Le coefficient  $S$  est défini par (1). On suppose que les contraintes normales selon  $O_r$ ,  $O_\theta$  et  $O_z$  sont les contraintes principales et que ces contraintes et les vitesses de déformation correspondantes ne dépendent

que de la distance radiale  $r$ . On les note  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\dot{\epsilon}_r$ ,  $\dot{\epsilon}_\theta$ ,  $\dot{\epsilon}_z$ . On note  $\mathbf{v}(V_r, V_z)$  le vecteur vitesse. La tôle frotte sur les outils selon une loi de Coulomb, de coefficient  $\mu$ . Pour  $r$  compris entre  $d$  (rayon interne de contact), et  $b$ , on a donc (2), en notant  $p$  la pression de contact (Fig.21).

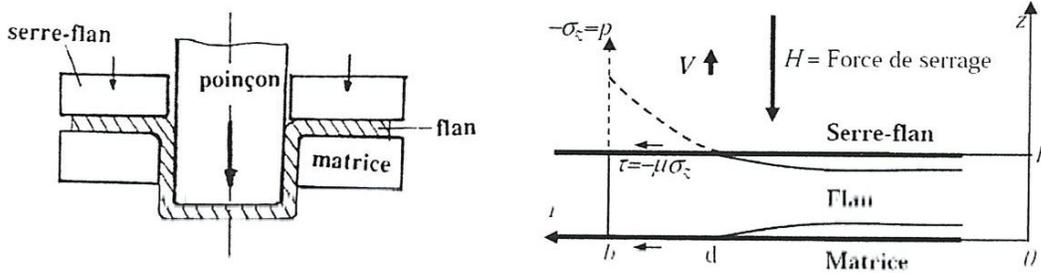


Fig.21 : Le procédé d'emboutissage profond et le contact du bord du flan avec la matrice et le serre-flan.

$$\sigma_{ob} = \sigma_0 \left( \frac{1+R}{2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\tau = -\mu\sigma_z = \mu p \quad (2)$$

Le critère de Hill 48 est donné par (3). La loi d'écoulement peut s'écrire selon (4). Comme les contraintes ne dépendent que de  $r$ , en introduisant la distance radiale réduite  $\bar{r}$  et selon l'expression (2), l'équation d'équilibre se simplifie en (5), en introduisant le nombre sans dimension  $M$  caractérisant le frottement :

$$(\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + R(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 = 2\sigma_{0b}^2 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{R\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_\theta} = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{R\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{R\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta} = \lambda \geq 0 \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_r}{d\bar{r}} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\bar{r}} - M\sigma_z = 0 \text{ avec } M = 2\mu \frac{b}{h} \text{ et } \bar{r} = \frac{r}{b} \quad (5)$$

Les conditions aux limites sont : le bord du flan est libre de contrainte (6) ; par continuité, la contrainte normale  $\sigma_z$  est nulle à la limite interne du contact (7) ; la force de serrage  $H$  est imposée (Fig.21) (8) :

$$\sigma_r(r = b) = 0 \quad \sigma_z(r = d) = 0 \quad (6)-(7)$$

$$H = \int_a^b p 2\pi r dr = \pi b^2 \int_a^1 2p \bar{r} d\bar{r} \text{ avec } \bar{d} = \frac{d}{b} \quad (8)$$

La partie en contact conserve une épaisseur uniforme  $h$ . Dans le cas  $H=0$ ,  $\sigma_z$  est nul en tout point et  $d=b$ . Sur le bord de la collerette ( $r=b$ ), en vertu de (6), de la loi d'écoulement (4) et de l'incompressibilité, on a :

$$\dot{\varepsilon}_\theta(b) = -(1 + R)\dot{\varepsilon}_z(b) \quad (9)$$

L'indice de gonflement périphérique de la tôle  $\alpha$  vaut :

$$\alpha = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = -\frac{1}{1 + R} \frac{1}{b} \frac{db}{dt} \Rightarrow h = h_0 \left( \frac{b_0}{b} \right)^{\frac{1}{1+R}}$$

Pour  $R=1$  (cas isotrope), c'est l'expression obtenue par Hill. Pour  $R$  croissant, à rétreint  $b_0/b$  donné, le gonflement diminue comme prévu. La relation (9) fixe la valeur maximale du phénomène de gonflement.

Dans le cas général, un champ de vitesse pour  $d \leq r \leq b$  peut s'exprimer avec deux paramètres  $V$ , vitesse du serre-flan par rapport à la matrice, et  $C$  sous la forme (10) ; d'où le champ de vitesse de déformation (11) :

$$V = (-[V/(2h)](r + Cb^2/r); V_z/h) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_r = [V/(2h)](-1 + C/\bar{r}^2) \\ \dot{\varepsilon}_\theta = [V/(2h)](-1 - C/\bar{r}^2) \end{cases} \begin{cases} \dot{\varepsilon}_z = V/h \\ \dot{\varepsilon}_{r\theta} = \dot{\varepsilon}_{rz} = \dot{\varepsilon}_{\theta z} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

A la périphérie, où  $r=b$ , en utilisant (9) et (11), on obtient :

$$0 \leq \frac{-\dot{\varepsilon}_z(b)}{\dot{\varepsilon}_\theta(b)} = \frac{2}{1+C} \leq \frac{1}{1+R} \Rightarrow C \geq 1 + 2R = S \quad (12)$$

On a défini par commodité  $S=1+2R$ . Lorsque le paramètre cinématique  $C$  croît de  $S$  à plus l'infini, on passe du cas de la contrainte plane au cas de la déformation plane ; l'épaisseur ne varie pas :  $\alpha=0$ .

## I.2. La Résolution du système d'équation et conditions explorées :

L'élimination des inconnues auxiliaires se fait comme suit : on reporte l'expression des vitesses de déformation dans la loi d'écoulement ; l'expression des différences de contrainte normales en fonction de  $\lambda$  et leur report dans le critère permet d'exprimer  $\lambda$  en fonction de  $\bar{r}$  et  $C'=C/S$ . On obtient l'équation définissant la pression de contact en exprimant  $\sigma_r$  et  $\sigma_\theta$  en fonction de  $\sigma_z$ ,  $\lambda$  et  $C'$  et en les reportant dans l'équation d'équilibre. Cette équation différentielle linéaire du premier ordre s'intègre avec la méthode de la « variation de constante » et on exprime les conditions aux limites (6), (7) et (8). On obtient :

$$\bar{P} = \exp(M\bar{r}) \int_{\bar{a}}^{\bar{r}} \exp(-Mu) g(u) \frac{du}{u} \text{ avec}$$

$$\bar{P} = \frac{P}{\sigma_{ob}} g(\bar{r}) = \frac{2SC'^2 f(\bar{r})}{(\bar{r}^4 + SC'^2)} f(\bar{r}) = (C' - \bar{r}^2)(\bar{r}^4 + SC'^2)^{-1/2} \quad (13)$$

Les deux grandeurs inconnues  $\bar{d} = d / b$  et  $C'$  sont solution du système d'équations qui se résolvent aisément sous Excel en fonction des trois paramètres du problème,  $R$ ,  $M$  et  $\bar{H}$ :

$$f(1) = \exp(M) \int_{\bar{a}}^1 \exp(-Mu) g(u) \frac{du}{u} \quad (14)$$

$$\bar{H} = \frac{H}{\pi b^2 \sigma_{ob}} = \frac{2}{M^2} \left( (M-1)f(1) + \int_{\bar{a}}^1 \left( \frac{1}{u} - M \right) g(u) du \right) \quad (15)$$

Précisons les ordres de grandeur en considérant les conditions données tableau 1, proches de celles des essais sur acier doux effectués sur presse pilote au CEMEF.

**Tableau.2** : Valeurs numériques des conditions d'emboutissage.

\* Essai de traction à  $V = 2000 \text{ mm/min}$ .

$\sigma_0 = 546(0.017 + \bar{\varepsilon})^{0.22} \text{ en MPa}$	$b_0 = 120 \text{ mm}$	$H=100 \text{ KN}$
$\mu = 0.10$	$h_0 = 1 \text{ mm}$	

On a donc en début d'opération :  $M_0 \approx 24$  et  $\bar{H}_0 = 0,01$ . En prenant à titre indicatif  $\alpha=0,4$  et en faisant varier  $b/b_0$  de 1 à 0,7, on constate que  $\bar{H}$  diminue de 20 %, puis remonte à sa valeur initiale, alors que  $M$  diminue de 60 %. Comme le contact évolue assez peu avec  $M$ , lorsque  $M$  est dans cette gamme de valeur (cf. ci-dessous), ceci suggère que le modèle pourrait décrire assez bien les conditions de contact au cours de l'emboutissage.

Les Résultats du modèle analytique, La pression de contact décroît de manière monotone du bord du flan vers l'intérieur. Cette décroissance est graduelle pour et plus brutale pour; le contact se concentre alors sur une couronne de largeur de l'ordre de 10 % du rayon du flan. Si l'augmentation de la force de serrage augmente la pression et élargit le contact pour, elle augmente essentiellement la pression.

### I.3. Modélisation de l'emboutissage profond par éléments finis :

#### I.3.1. Paramètres de la simulation :

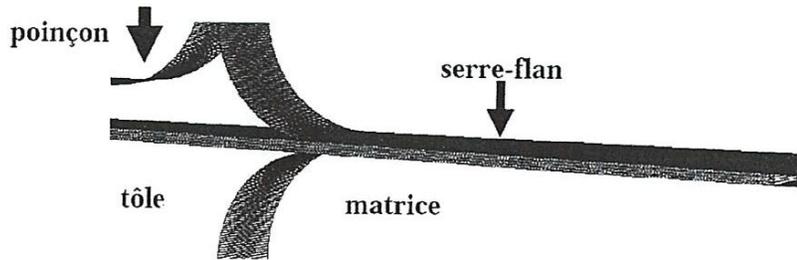


Fig.22 .Vue d'ensemble de la géométrie de la mise en données de la simulation.

On réalise une simulation en 2D sous l'hypothèse d'axisymétrie avec le logiciel Forge 2005 (Fig.22). La rhéologie de la tôle, considérée comme élasto-plastique isotrope, et les conditions d'emboutissage sont données dans le (Tableau.1). Les outils sont modélisés par des pièces indéformables. Le maillage de la tôle comporte 4 éléments dans l'épaisseur, et les outils ont un pas entre nœuds de 0,25 mm (Fig.23). Le rapport d'emboutissage  $\beta = b_0/a$  ( $a$  rayon de matrice) vaut 1,9. Le coefficient de frottement entre la tôle et le poinçon vaut 0,1, sauf mention contraire. Le coefficient de frottement entre la tôle et les autres outils prend des valeurs telles que  $M_0$  varie entre 1,9 et 40. On note ci-dessous  $M_0$  par  $M$ ,  $\sigma_0$  la limite d'élasticité initiale de la tôle et  $\bar{r} = r / b$ . On travaille à  $\bar{H}_0 = 0,010$ .

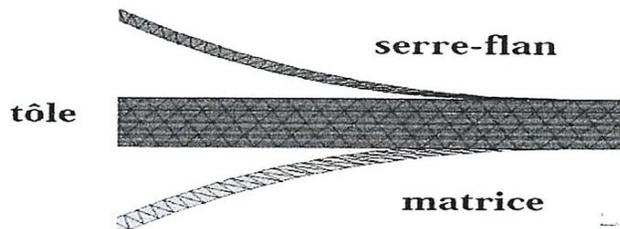


Fig.23 : Détail du maillage de la tôle et des arrondis de matrice et de serre flan (rayon 10mm).

### I.3.2. Les Résultats de la simulation numérique :

Pour  $M$  donnée, après une course de poinçon  $\Delta L$  de quelques  $mm$ , le profil de pression de contact avec le serre-flan varie peu avec la profondeur emboutie. Cette faible variation correspond toutefois à une augmentation de  $\bar{P}(\bar{r} = 1)$  et une diminution de  $\bar{d}$ . Dans la suite, nous nous plaçons à  $\Delta L = 23.5$  mm, ce qui correspond à  $b/b_0 \sim 0,88$ . On observe un pic de pression peu après la position de l'arrondi de matrice. Ce pic est dû à la flexion de la tôle provoquée par l'appui du poinçon et le contre appui sur la matrice. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle analytique. La position absolue du pic varie peu au cours de l'emboutissage. Le pic de pression est relativement élevé, ce qui diminue la force supportée par la partie extérieure du flan. Par la suite, nous ignorons ce phénomène pour la définition de  $\bar{d}$ . Pour  $M=0$ ,  $M=2,4$  et  $M=24$ ,  $\bar{d}$  vaut respectivement 0,82, 0,83 et 0,89, valeurs en très bon accord avec celles issues du modèle analytique. Le changement de forme du profil avec  $M$  est également en bon accord : pour  $M \approx 2$ , le profil est croissant avec une dérivée décroissante, et  $\bar{P}_{max} = 0.05$ ; pour  $M \approx 20$ , le profil est croissant avec une dérivée croissante, et  $\bar{P}_{max} = 0.14$ . Des simulations complémentaires montrent que l'inversion de tendance a lieu pour  $M \approx 4,5$ , avec un profil linéaire, ce que prévoit également le modèle analytique. Largeur de contact et pression maximale sont voisines. La figure 8 représente les profils d'épaisseur de la tôle sous serre-flan pour différentes valeurs de  $M$ . Conformément aux prévisions du modèle, l'épaisseur maximale atteinte est une fonction décroissante de  $M$ . Le modèle analytique donne, pour cette course et donc une valeur de  $b$  donnée,  $h(M=2) = 1,035$  et  $h(M=20) = 1,033$  (cf. (9)). On constate que la prévision analytique est très bonne pour des  $M$  proches de 2, mais surestime l'épaississement pour  $M$  proche de 20. L'écart est croissant avec  $M$ .

Enfin le modèle analytique développé décrit bien le phénomène de concentration du contact à la périphérie du flan et fournit un très bon ordre de grandeur des pressions de contact. La simulation numérique valide le modèle et complète la description de l'emboutissage profond ; elle en montre que la flexion de la tôle entre le poinçon et la matrice crée une zone de contact très étroite supplémentaire. Elle fournit une meilleure estimation des variations d'épaisseur à fort frottement. En outre, elle montre que le frottement sur le poinçon plat, qui est sans influence sur la force d'emboutissage, a une influence non négligeable sur la distribution d'épaisseur du produit.

# **Chapitre II**

## **Etude expérimentale**

Dans ce chapitre nous allons faire :

- **Caractérisation mécanique des tôles :**

Les essais de traction statique permettent de caractériser notre matériaux utilisé avec différent épaisseurs et suivant le sens et travers de sens de laminage.

- **Collage des jauges :**

Nous allons coller des jauges unidirectionnelles sur les éprouvettes qui nous allons emboutir et ceci de part et d'autre de la pièce une dans le sens longitudinal.

- **Emboutissage :**

Nous avons réalisé un dispositif d'emboutissage au laboratoire monté sur une machine de Hoyton 100 KN ou nous allons faire les essais d'emboutissage et prendre les valeurs des déformations longitudinales qui nous allons voir le comportement de l'amincissement de la tôle lors de l'opération d'emboutissage et ceci en prenant les valeurs de la mesure d'épaisseur.

## **II.1 Caractéristiques mécaniques des tôles.**

### **II.1.1 Matériaux utilisées :**

Le matériau utilisé est acier XC 50 avec épaisseur de 0.5, 0.7 et 1 mm.

### **II.1.2 Machine utilisé :**

Nos expériences de caractérisation, sont réalisées sur 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 menu 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 maxi, résistance à la rupture, charge à la limite d'élasticité conventionnelle, A%) et le tracé du diagramme de traction.

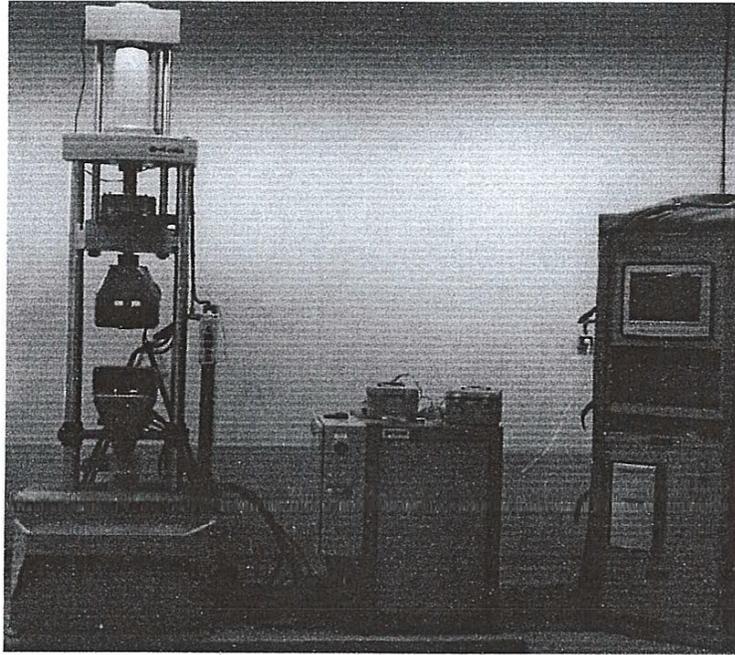


Fig. 24 : La machine HOYTON-S-L

### II.1.3 Extensomètre :

Extensomètre à pince est une appareil de mesure de l'allongement longitudinal d'une éprouvette de traction, de base de mesure de 50mm entre les pinces, il est lié par l'ordinateur avec câble data.

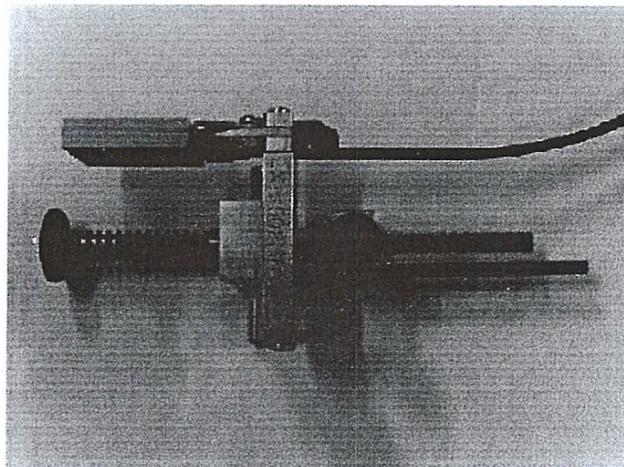


Fig. 25 : Extensomètre.

### II.1.4 Préparation des tôles :

Après avoir coupé les tôles suivant les dimensions de 200 mm de longueur et 20 mm de largeur. (ASTME08)

On a suivi les étapes de préparation des tôles suivantes :

- Nettoyage de la tôle avec papier abrasif.
- Traçage du milieu de la tôle avec un traceur permanent.
- Nettoyage de la tôle avec du trichloréthylène en utilisant du coton tige.

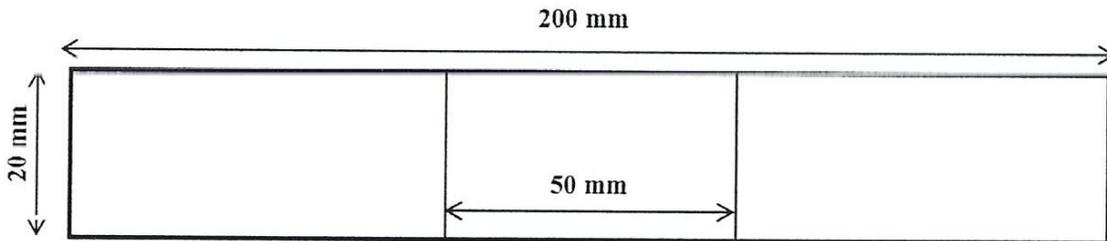


Fig. 26 : Eprouvette de traction.

## II. 2 Emboutissage :

### II.2.1 Matériaux utilisée :

Le matériau utilisé est acier XC 50 avec épaisseur de 0.5, 0.7 et 1 mm.

### II.2.2 Machine d'emboutissage et dispositif :

Pour faire les essais d'emboutissage nous avons utilisé une machine Hoyton 100KN.

Nous avons utilisé un dispositif d'emboutissage réalisé au laboratoire et utilisé par S.Ellagoune et M.Boivin [10].

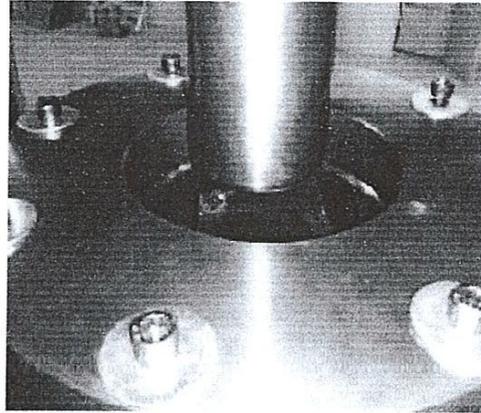


Fig. 28 : Essai d'emboutissage.

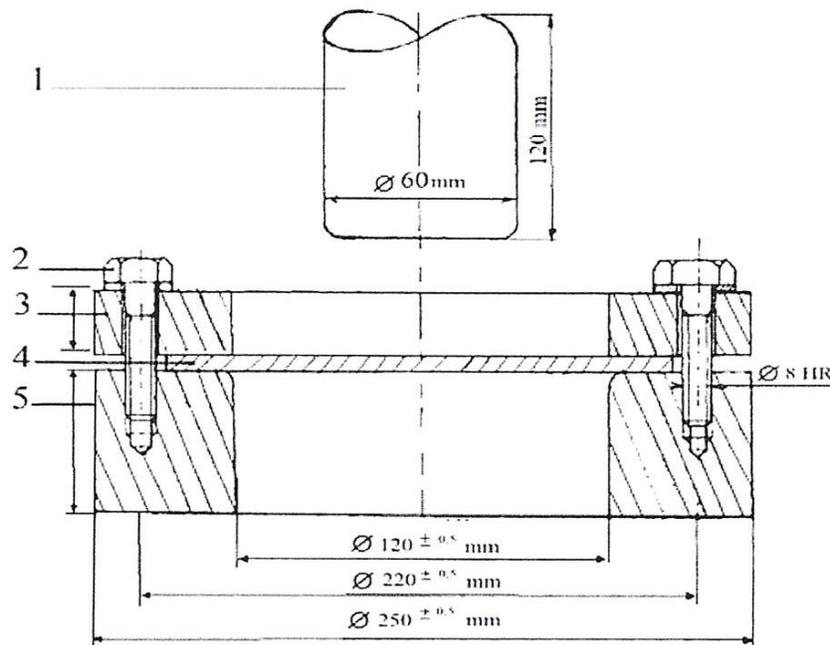


Fig. 29 : Dispositif utilisée [10].

### II.2.3 Mesure de déformation :

Pour mesure des déformations en utilisent les jauges.

#### II.2.3.1 Généralités :

Il existe une grande variété de jauges de déformations. Leur principe de fonctionnement est basé sur le principe de **Wheatstone**. Parmi ces capteurs ceux qui utilisent des jauges électriques sont des plus nombreux.

A égalité de performances avec d'autres méthodes. Ces procédés ont l'avantage d'utilisé des instruments universels susceptibles d'emplois variés et d'une technique parfaitement définie.

Un capteur à jauge comprend donc un dispositif mécanique destiné à provoquer sous l'influence du phénomène à étudier par exemple une force, une pression, les déformations d'une plaque métallique dite « corps d'épreuve ». Des jauges collées sur ce corps d'épreuve et convenablement groupées transformant ces déformations en variations de résistance, mesurées dans les mêmes conditions que lorsqu'il s'agit d'étudier la déformation d'une structure pour en calculer les contraintes. Les précisions obtenues peuvent être considérablement supérieures à celles que donnent les mesures de contraintes. Alors que dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utilisé dans les calculs de facteur de jauge, qui n'est connu que par des prélèvements statistiques, à environ 0.5% près.

#### II.2.3.2 Pont d'Extensomètre.

##### a) Jauge de contrainte :

Une jauge de contrainte est constituée par un fil électriquement conducteur très fin, plié en accordéon et collé entre deux fines feuilles isolantes. La jauge est parfaitement collée sur l'éprouvette dans la direction de l'allongement. On mesure la variation de sa résistance électrique qui lui est directement liée, pour un fil de longueur  $L$ , de section  $S$  et de résistance  $\rho$ , la résistance électrique est en effet

$$R = \rho L/S.$$

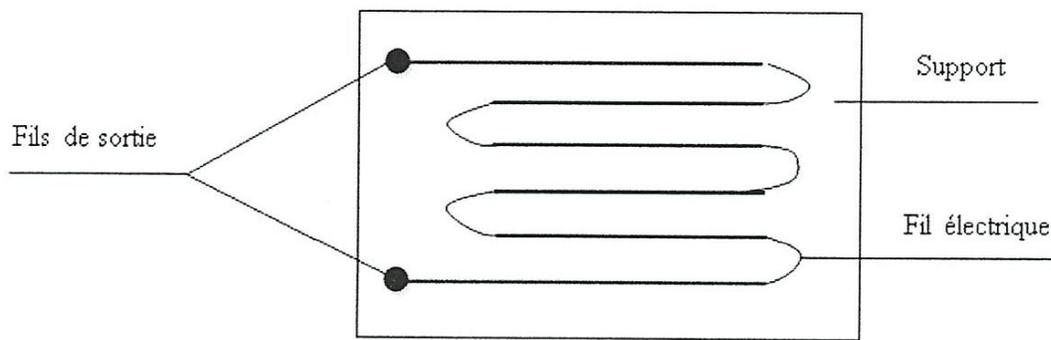


Fig. 30 : Jauge électrique

On en déduit les variations relatives de ces quantités.

$$\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta L/L - \Delta S/S$$

La variation de la section est elle-même  $\Delta S/S = 2 \Delta d/d$ ,  $d$  étant le diamètre de l'éprouvette.

On nomme coefficient de poisson, que l'on note  $\nu$ , le rapport entre la contraction transversale relative et l'allongement relatif.

$$\text{Soit : } \Delta d/d = \nu \Delta L/L$$

Pour un fil métallique de résistivité constante, on aura :

$$\Delta R/R = (1+2\nu) \Delta L/L = K \Delta L/L$$

$K$  est la constante de jauge, de l'ordre de 2 avec un coefficient de poisson qui est lui-même de l'ordre de 0.5.

Les variations relatives de résistance à mesurer sont donc elles-mêmes très faibles, ce qui nécessite une amplification.

### b) Principe d'un pont d extensomètre (pont de Wheatstone) :

La mesure de la variation de résistance de la jauge s'effectue avec un pont de **Wheatstone**, dont la condition d'équilibre est  $R_1 = R_2 R_4$

On le constitue avec :

$R_1$  : la jauge à étudier

$R_2$  : Jauge témoin identique non chargée mais soumise.

Conditions extérieures (température) pour en neutraliser les effets.

$R_3$  : résistance variable comme serre à équilibre le pont.

$R_4$  : résistance constante égale à  $R_3$  initiale.

Après mise en charge ou rétablit l'équilibre en agissant sur  $R_3$ .

$$\Delta R_1 / R_1 = \Delta R_3 / R_3$$

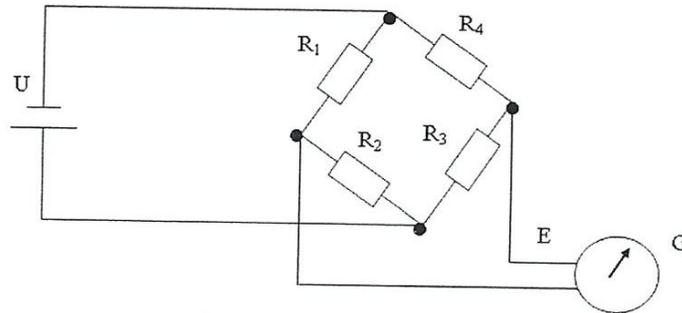


Fig. 31 : Facteur de jauge.

#### II.2.4 Le mesureur d'amincissement DM 4DL :

Le mesureur d'épaisseur DM 4DL il permet la mesure ultrasonique de l'épaisseur de la paroi des pièces exemple les canalisation et des réservoirs et particulièrement pour les pièces susceptibles à la corrosion et l'érosion. il permet un grand stockage d'informations allant d'un fichier de 999 donnée jusqu'à 5990 fichiers pouvant stocké à partir d'un donnée jusqu'à 999 données il est reliée a une imprimante Epson (DPU 6414) et aussi lie à un microordinateur de type PC a l'aide d'une carte d'acquisition de données et géré par le logiciel Ultramate de communication et de gestion des données stockées dans le mesureur d'épaisseur.



Fig. 32 : Le mesureur d'épaisseur DM 4DL

### II.3 Préparation des tôles :

Après avoir coupé les tôles suivant les dimensions de 240mm de longueur et 60mm de largeur on a suivi les étapes suivantes :

- nettoyage de la tôle avec papier abrasif
- Traçage de la position de la jauge et la position de mesure de l'épaisseur
- Nettoyage de la position prévue pour le collage des jauges longitudinale et les cosses relais avec un catalyseur et un neutralisateur en utiliser du coton-tige et des compresses de coton.
- Collage des jauges bidimensionnelles ( $K=0.995$ ) et les cosses relais sur la tôle sur la tôle à l'aide d'une colle spéciale.
- Soudage des fils électrique entre la jauge et la cosse relais (ce sont des brins)et aussi de la cosse vers l'extensomètre.
- Vérification de la résistance de jauge après soudage ( $R=120\Omega$ ) et ceci a l'aide d'un multimètre.

### II.4 Manipulation :

Lors du montage expérimental et afin de réaliser les essais d'emboutissage nous avons suivi les étapes suivantes :

- Après avoir collé les jauges on a fixé l'éprouvette entre la matrice et le serre-flan en tenant compte du centrage de cette éprouvette.
- Placer le dispositif sur la machine
- Réglage de pont extensomètre à zéro.
- Lancer l'opération d'emboutissage en prenant les mesures des déformations à l'aide du pont d'extensomètre.

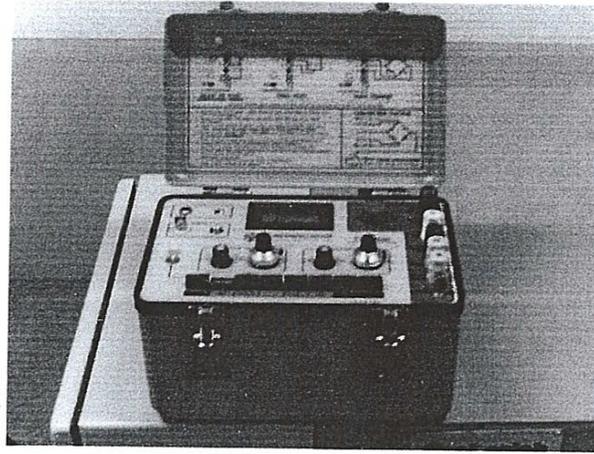


Fig. 33 : Pont d'extensomètre.

## II.5 Les courbes de traction :

Tableau1 : Les grandeur  $F_{\max}$ ,  $F_{\text{rup}}$ ,  $\sigma_e$ , E pour épaisseur de 0.5mm ( $0^\circ$ ).

Grandeurs	
$F_{\max}(\text{N})$	3023.228
$F_{\text{rup}}(\text{N})$	2904.726
$\sigma_e(\text{N}/\text{mm}^2)$	212.7567
E(GPa)	222.045

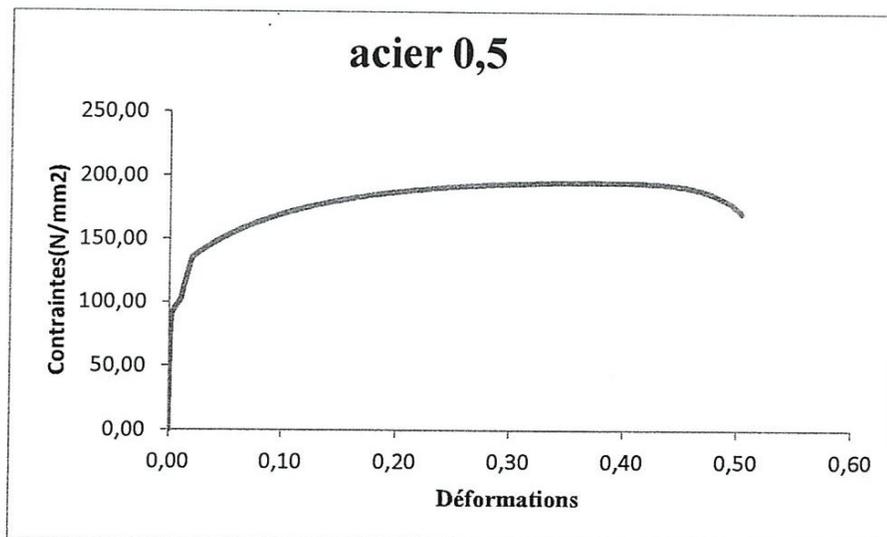
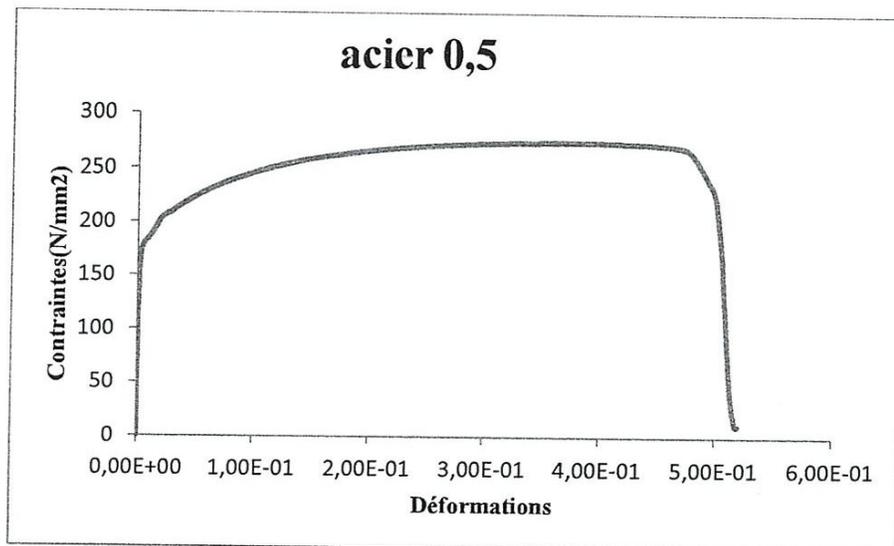


Fig. 34 : Courbe de tarction pour épaisseur de 0.5mm (longitudinale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 0.5 mm .En voit bien que il y a une partie élastique jusqu'à 212.75 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (290.472 MPa) et la force max est 3023.22 N.

**Tableau2** : Les grandeur  $F_{max}$ ,  $F_{rup}$ ,  $\sigma_e$ , E pour épaisseur de 0.5mm (transversale).

Grandeurs	
$F_{max}(N)$	4263.938
$F_{rup}(N)$	227.5044
$\sigma_e(N/mm^2)$	359.9731
E(GPa)	225.241

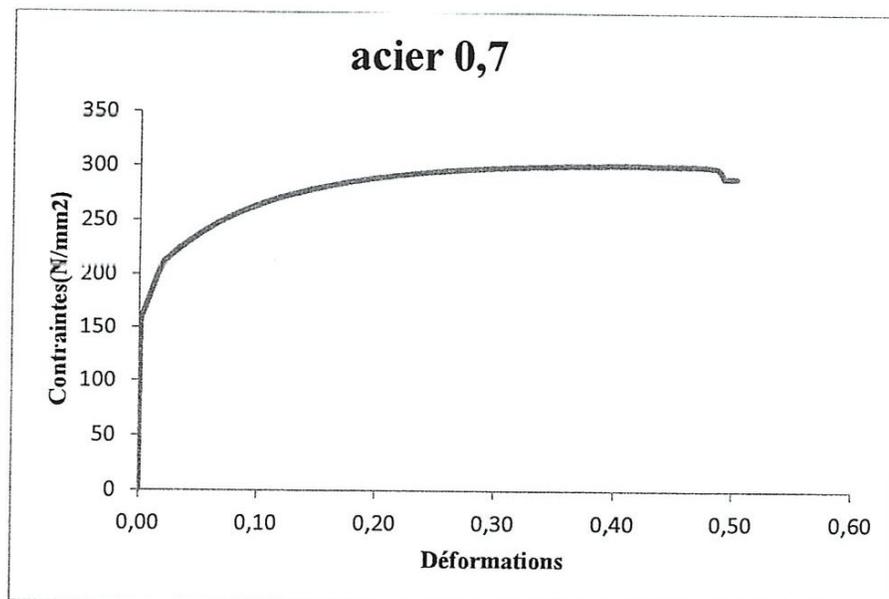


**Fig. 35** : Courbe de tarction pour épaisseur de 0.5mm (transversale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 0.5 mm .En voit bien que il y a une partie élastique jusqu'à 359.9731 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (227.5044 MPa) et la force max est 4263.938 N.

**Tableau3** : Les grandeur  $F_{\max}$ ,  $F_{\text{rup}}$ ,  $\sigma_e$ , E pour épaisseur de 0.7mm (longitudinale).

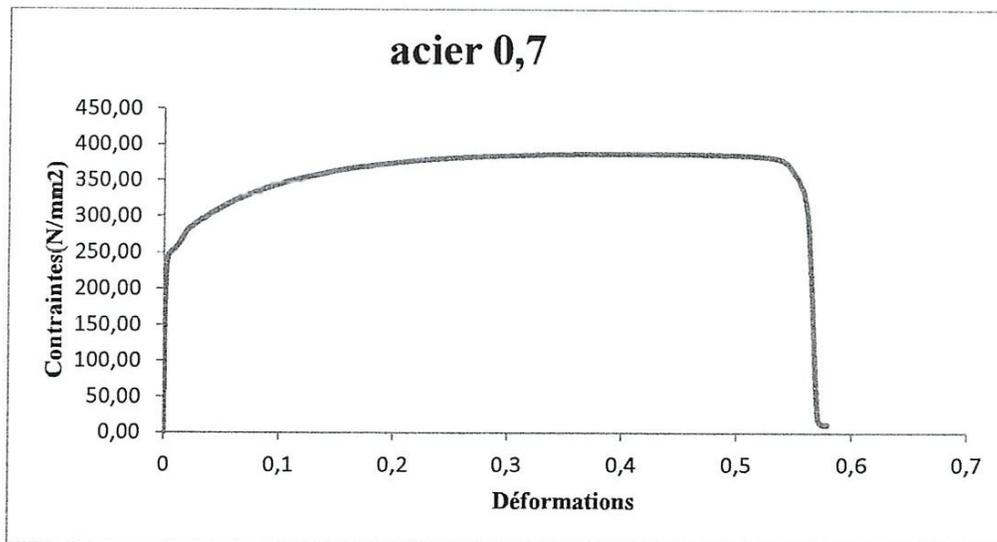
Grandeurs	
$F_{\max}$ (N)	2738.393
$F_{\text{rup}}$ (N)	2398.46
$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	135.4639
E(GPa)	219.658

**Fig. 36** : Courbe de traction pour épaisseur de 0.7mm (longitudinale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 0.7 mm .En voit bien que il y a une partie élastique jusqu'à 135.4639 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (2398.46 MPa) et la force max est 2738.393 N.

**Tableau 4** : Les grandeurs  $F_{\max}$ ,  $F_{\text{rup}}$ ,  $\sigma_e$ ,  $E$  pour épaisseur de 0.7mm (transversale).

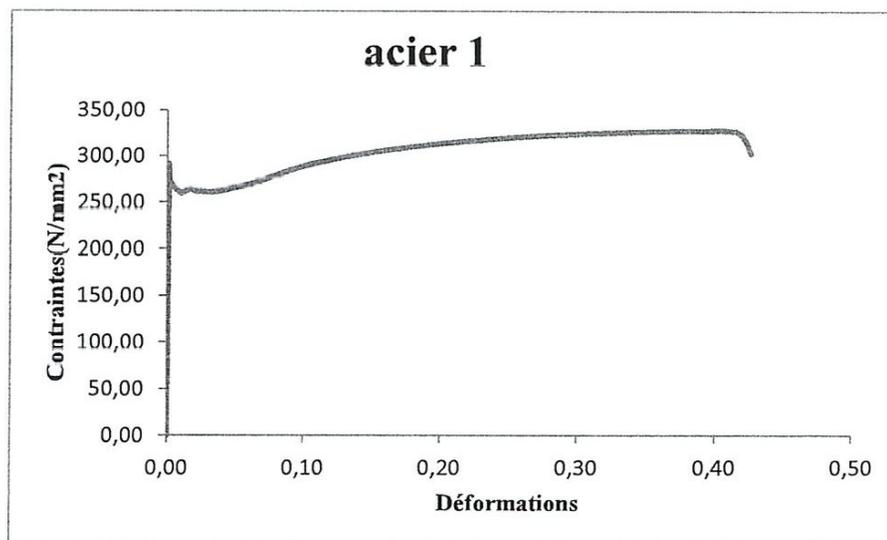
Grandeurs	
$F_{\max}$ (N)	3852.896
$F_{\text{rup}}$ (N)	2939.292
$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	204.1597
$E$ (GPa)	225.989

**Fig. 37** : Courbe de traction pour épaisseur de 0.7mm (transversale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 0.7 mm. On voit bien que il y a une partie élastique jusqu'à 204.1597 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (2939.292 MPa) et la force max est 3852.896 N.

**Tableau5** : Les grandeurs  $F_{max}$ ,  $F_{rup}$ ,  $\sigma_e$ ,  $E$  pour épaisseur de 1 mm (longitudinale).

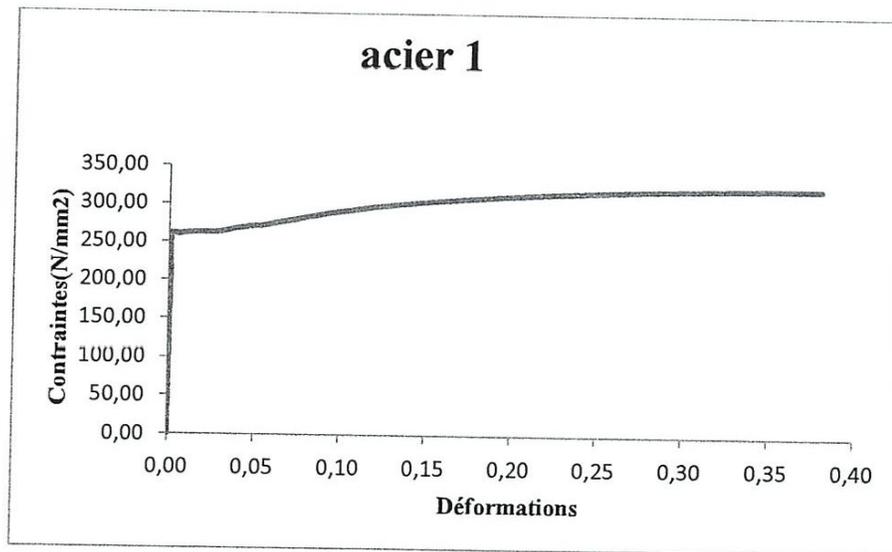
Grandeurs	
$F_{max}(N)$	6569.111
$F_{rup}(N)$	6063.441
$\sigma_e(N/mm^2)$	261.849
$E(GPa)$	243.9

**Fig. 38** : Courbe de traction pour épaisseur de 1mm (longitudinale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 1mm. On voit bien qu'il y a une partie élastique jusqu'à 261.849 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (6063.441 MPa) et la force max est 6569.111 N.

**Tableau 6** : Les grandeurs  $F_{max}$ ,  $F_{rup}$ ,  $\sigma_e$ ,  $E$  pour épaisseur de 1mm (transversale).

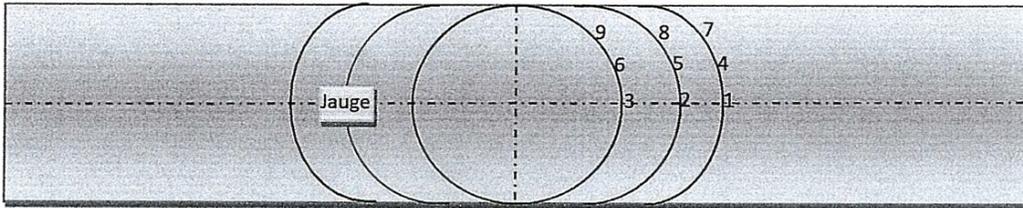
Grandeurs	
$F_{max}(N)$	6474.257
$F_{rup}(N)$	6474.257
$\sigma_e(N/mm^2)$	262.6871
$E(GPa)$	220.694

**Fig. 39** : Courbe de traction pour épaisseur de 1mm (transversale).

La figure ci-dessus présente la courbe de traction pour une tôle d'épaisseur 1mm. On voit bien que il y a une partie élastique jusqu'à 262.6871 MPa suivie par une partie plastique jusqu'à (6474.257 MPa) et la force max est 6474.257 N.

## II.6 Les essais de l'emboutissage :

Les tableaux ci-dessous présentent les différentes épaisseurs en chaque point de mesure qui ont choisies :



**Fig. 40** : Différents points de mesure d'épaisseur.

**Tableaux 7** : Différents points de mesure d'épaisseur pour 0.5 mm.

\*Pour l'épaisseur 0.5 mm :

-Avant essai :

Position	Epaisseur
1	0,56
2	0,56
3	0,58
4	0,5
5	0,52
6	0,52
7	0,57
8	0,56
9	0,52

-Après essai :

position	Epaisseur
1	0,54
2	0,54
3	0,5
4	0,48
5	0,5
6	0,5
7	0,5
8	0,5
9	0,52

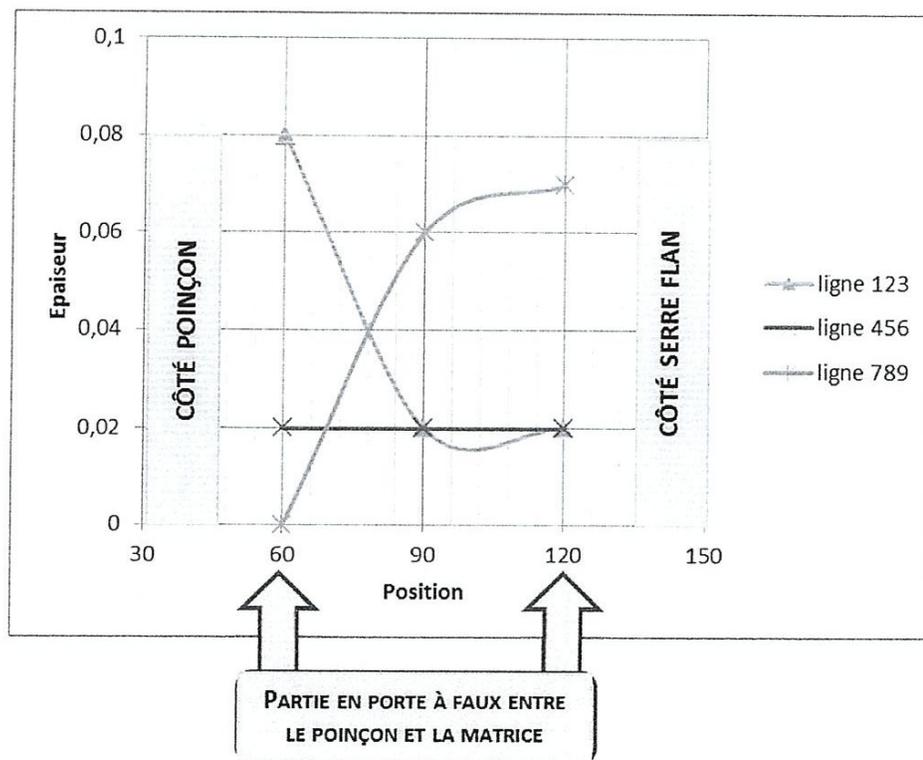


Fig. 41 : Evolution de différence d'épaisseur avec la position pour épaisseur 0.5mm.

La figure ci-dessus présente l'évolution de la différence d'épaisseur entre l'épaisseur avant et après l'essai pour la tôle d'épaisseur de 0.5mm, on voit bien que la ligne 123 est plus aminci dans côté poinçon par rapport aux lignes 456 et ligne 789 qui aminci au côté de serre flan.

**Tableaux 8** : Différents points de mesure d'épaisseur pour 0.7 mm.

\*Épaisseur de 0.7 :

-Avant essai :

Position	Epaisseur
1	0,7
2	0,68
3	0,64
4	0,69
5	0,65
6	0,65
7	0,7
8	0,65
9	0,68

-Après essai :

Position	Epaisseur
1	0,59
2	0,5
3	0,54
4	0,55
5	0,5
6	0,54
7	0,59
8	0,57
9	0,59

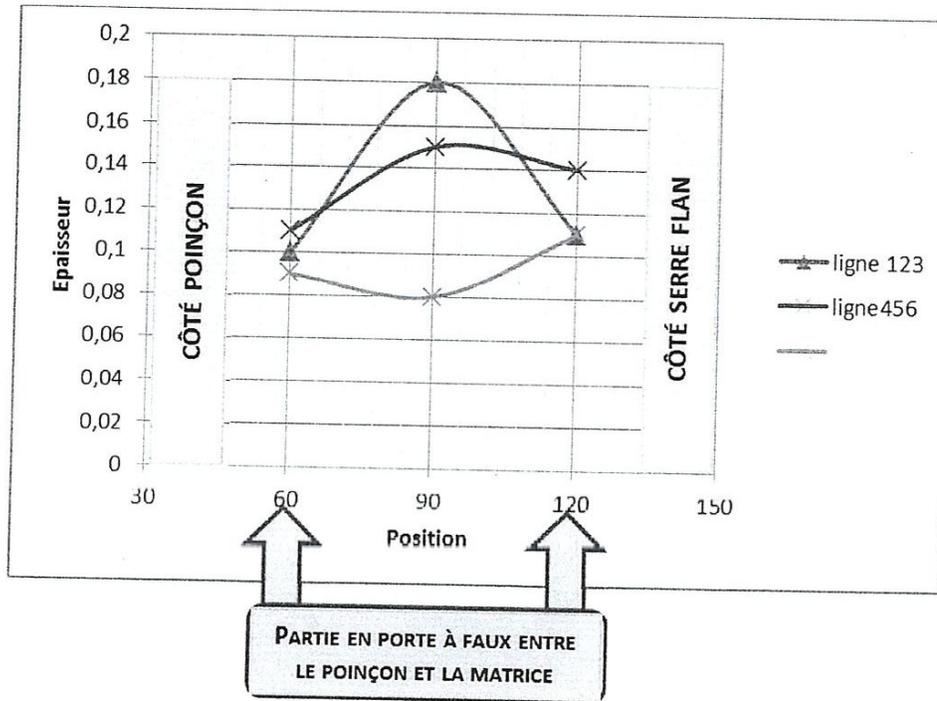


Fig. 42 : Evolution de différence d'épaisseur avec la position pour épaisseur 0.7mm.

La figure ci-dessus présentent l'évolution de la différence d'épaisseur entre l'épaisseur avant et après l'essai pour la tôle d'épaisseur de 0.7mm, qui montre que la ligne 123 est plus amincit dans côté milieu de la partie déformer par rapport aux lignes 456 et ligne 789 qui. Et sur les côtés poinçon et serre flan la différence presque la même.

**Tableaux9** : Différents points de mesure d'épaisseur pour 1 mm.

\*Épaisseur de 1mm :

-Avant essai :

Position	Epaisseur
1	1
2	1
3	1,01
4	1,01
5	1
6	1
7	1,01
8	0,99
9	1

-Après essai :

Position	Epaisseur
1	0,94
2	0,91
3	0,94
4	0,92
5	0,94
6	0,92
7	0,93
8	0,92
9	0,92

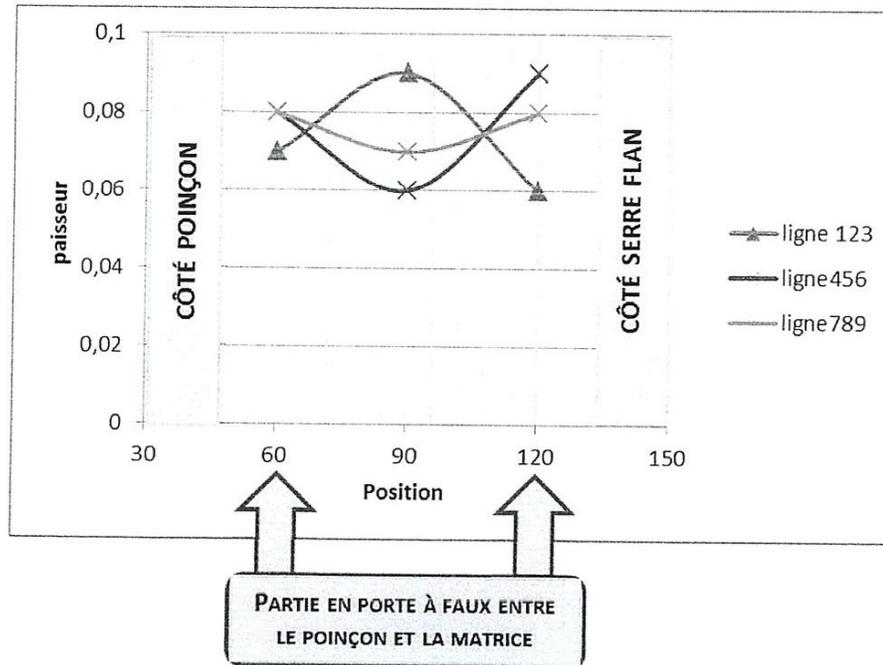
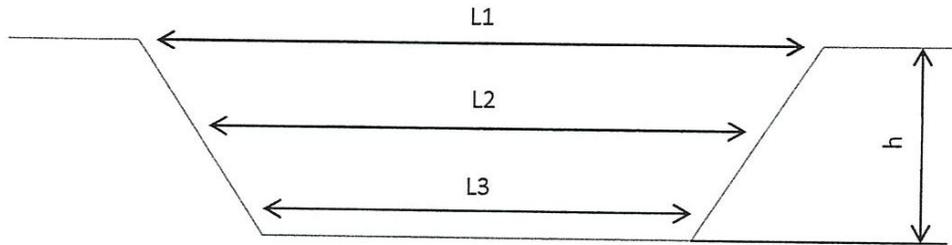


Fig. 43 : Evolution de différence d'épaisseur avec la position pour épaisseur 1mm.

La figure ci-dessus présentent l'évolution de la différence d'épaisseur entre l'épaisseur avant et après l'essai pour la tôle d'épaisseur de 1mm, on voit bien que la ligne 123 est plus amincit au milieu par rapport aux lignes 456 et ligne 789. Mais la ligne 456 est plus amincit aux côté de serre flan.

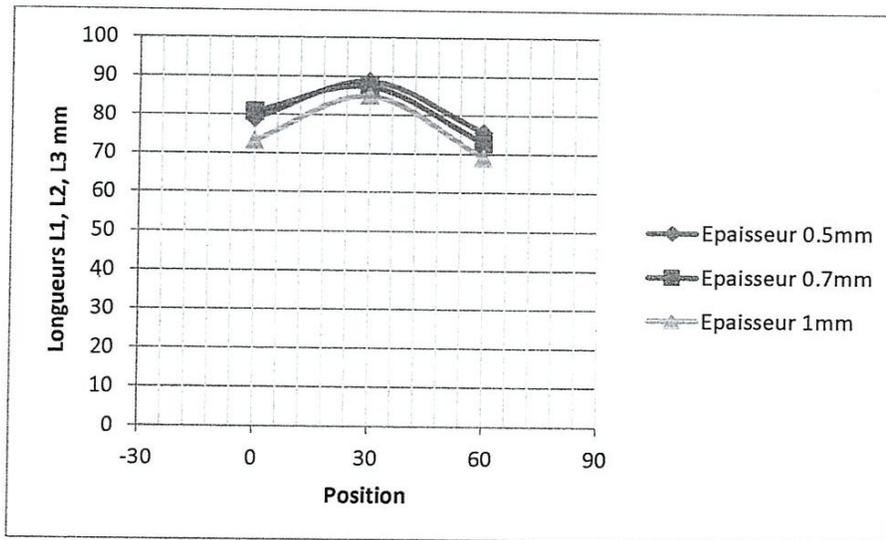
**II.7 Les dimensions de la tôle après déformation :**



**Fig. 44 :** Les Longueurs  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  de la tôle déformé pour épaisseurs (1mm, 0.7mm, 0.5mm), et la hauteur.

**Tableau10 :** Longueurs  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  de la tôle déformé pour épaisseurs (1mm, 0.7mm, 0.5mm).

	Epaisseur 0.5mm	Epaisseur 0.7mm	Epaisseur 1mm
L1	79	80,9	73,4
L2	88,9	87,5	85
L3	75,7	72,8	69,1

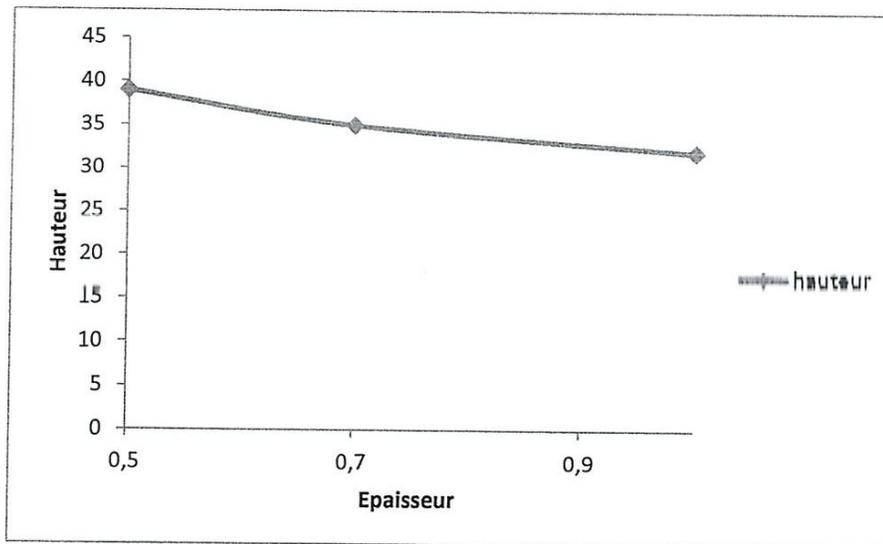


**Fig. 45 :** Evolution de la longueur par rapport à la position.

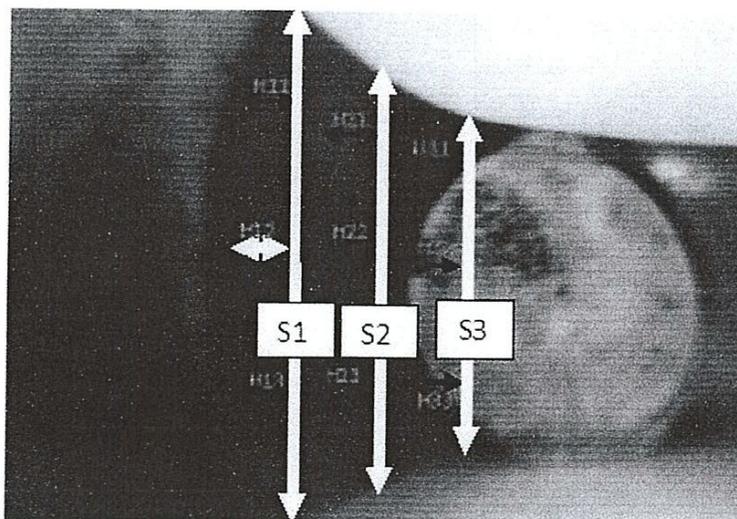
On voit que les longueurs  $L1$  ;  $L2$  ;  $L3$  dans les trois épaisseurs sans les mêmes. Soit dans les positions 60, 30 ou 0.

**Tableau 11** : Hauteur h de la tôle déformé pour épaisseur de (0.5mm, 0.7mm, 1mm).

	Epaisseur 0.5mm	Epaisseur 0.7mm	Epaisseur 1mm
h	39	35	32

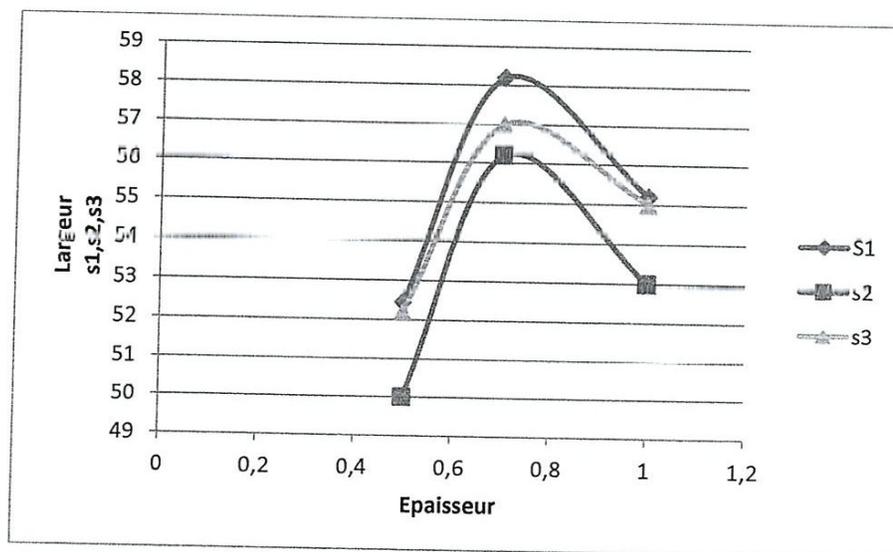
**Fig. 46** : Evolution de la hauteur par rapport à l'épaisseur.

On voit bien que dans la courbe hauteur (h) avec les épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) est h diminué si l'épaisseur est augmenté.

**Fig. 47** : Les largeurs S1, S2, S3 et les convections H (S1) de la tôle déformés pour épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) coté serre flan.

**Tableau 12 :** Largeurs  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  de la tôle déformé pour épaisseur de (0.5mm, 0.7mm, 1mm).

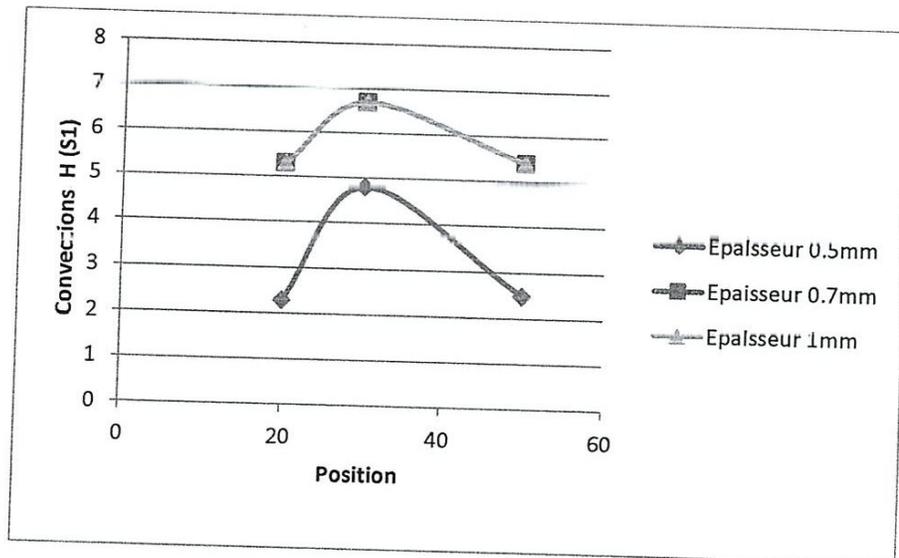
	Epaisseur 0.5mm	Epaisseur 0.7mm	Epaisseur 1mm
S1	52.45	58.2	55.2
S2	50	56.2	53
S3	52,2	57	55

**Fig. 48 :** Evolution de la largeur par rapport à l'épaisseur.

On voit bien dans les courbes de largeurs  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  avec la variation de l'épaisseur que la largeur  $S_2$  est plus petit par rapport les autre dans les trois épaisseurs.

**Tableau13** : Convections H (S1) de la tôle déformés pour épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) coté serre flan

	Epaisseur 0.5mm	Epaisseur 0.7mm	Epaisseur 1mm
H11	2,3	5,3	5,3
H12	4,8	6,7	6,7
H13	2,5	5,4	5,4

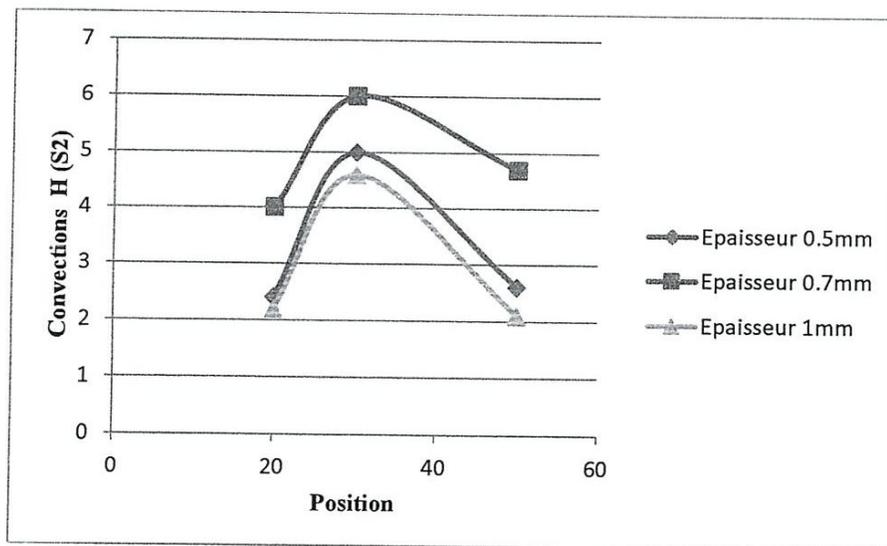


**Fig. 49** : Evolution des convections H (S1) par rapport à la position.

Dans les figures de convection H (S1) on voit que la convection diminue au côté de la tôle tester aux positions 20 et 50 et augmente dans le milieu de la tôle position 30.

**Tableau14 :** Convections H (S2) de la tôle déformés pour épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) au milieu

	Epaisseur 0.5mm	Epaisseur 0.7mm	Epaisseur 1mm
H21	2,4	4	2,2
H22	5	6	4,6
H23	2,6	4,7	2,1

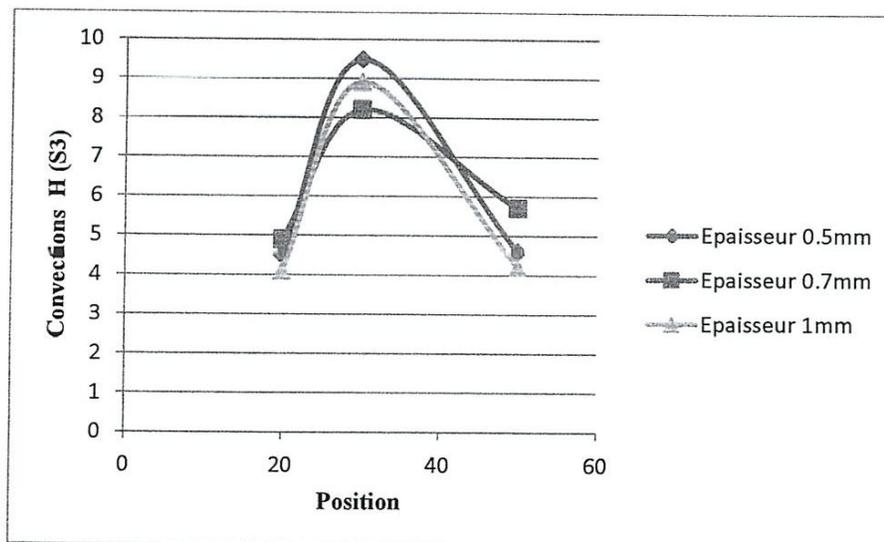


**Fig. 50 :** Evolution des convections H (S2) par rapport à la position.

Dans les figures de convection H (S2) on voit que la convection diminue au côté de la tôle tester aux positions 20 et 50 et augmente dans le milieu de la tôle position 30.

**Tableau15** : Convections H (S3) de la tôle déformés pour épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) coté poinçon.

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



**Fig. 51** : Evolution des convections H (S3) par rapport à la position.

Dans les figures de convection H (S3) on voit que la convection diminue au côté de la tôle tester aux positions 20 et 50 et augmente dans le milieu de la tôle position 30.

## II.8 Les graphes charge & déplacement :

### Épaisseur de 0.5 mm :

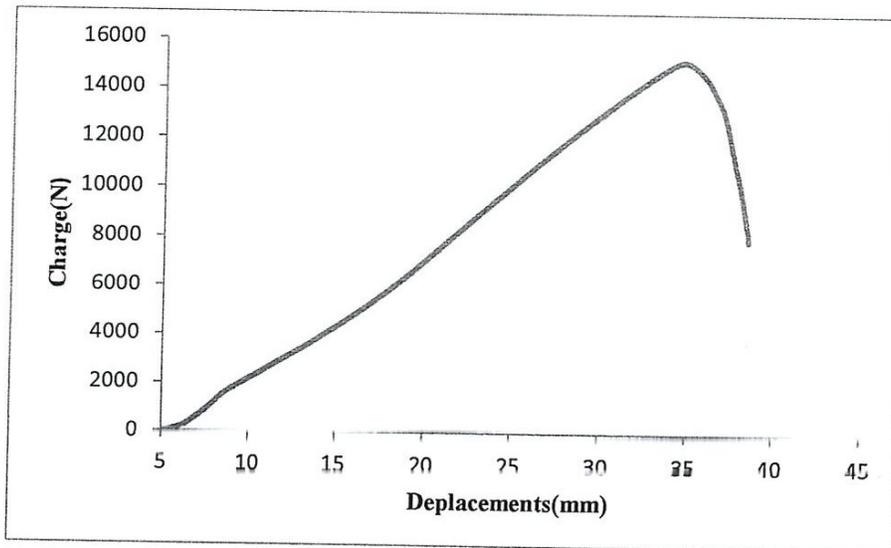


Fig. 52 : Courbe de charges et déplacements pour épaisseur 0.5mm.

Dans la figure charge déplacement de l'essai de l'emboutissage pour la tôle d'épaisseur 0.5mm .et la charge augmente avec l'augmentation de déplacement du poinçon jusqu'à la rupture de l'éprouvette au charge 15165.09 N.

### Epaisseur de 0.7mm :

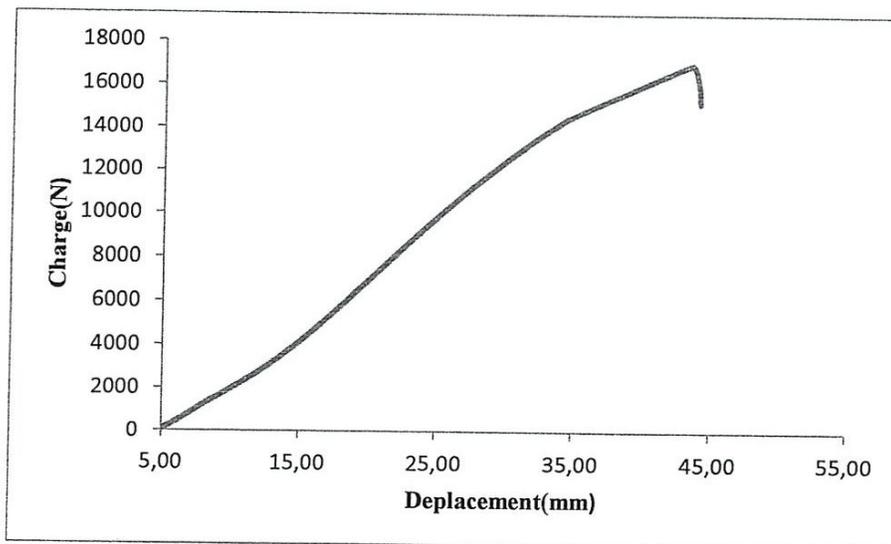


Fig. 53 : Courbe de charges et déplacements pour épaisseur 0.7mm

Dans la figure charge déplacement de l'essai de l'emboutissage pour la tôle d'épaisseur 0.7mm .et la charge augmente avec l'augmentation de déplacement du poinçon jusqu'à la rupture de l'éprouvette au charge 16800.74 N.

### Epaisseur de 1mm :

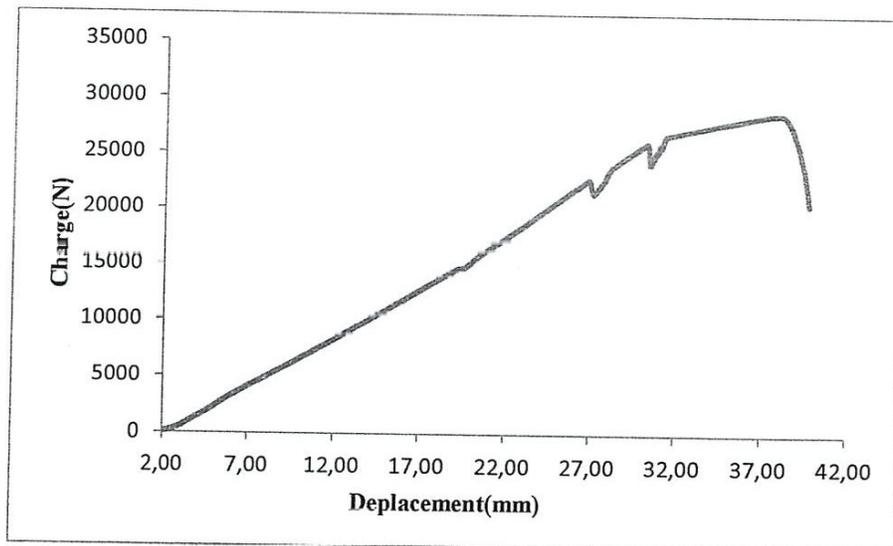


Fig. 54 : Courbe de charges et déplacements pour épaisseur 1mm.

Dans la figure charge déplacement de l'essai de l'emboutissage pour la tôle d'épaisseur 1mm .et la charge augmente avec l'augmentation de déplacement du poinçon jusqu'à la rupture de l'éprouvette au charge 28660.65 N.

## II.9 Courbe de déformation :

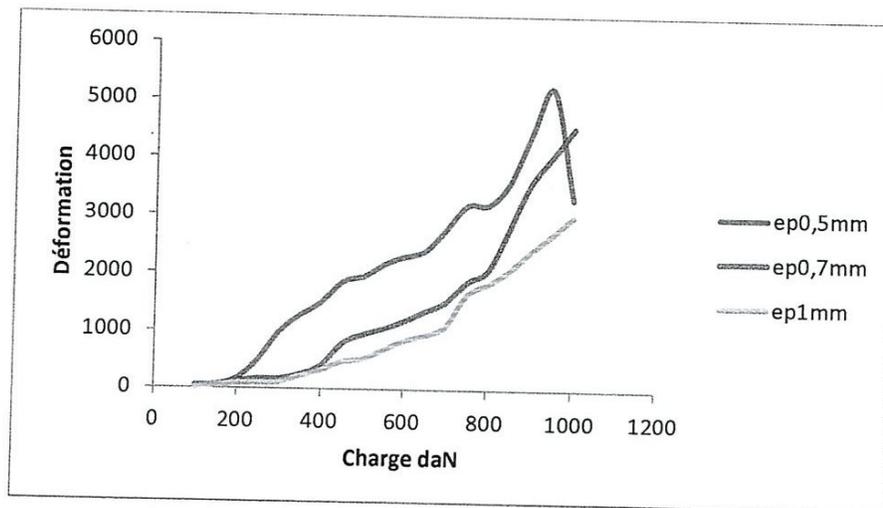


Fig. 55 : Courbe de déformation (0.5mm ,0.7mm ,1mm)

Les figures ci-dessus présentent l'évolution de déformation de la tôle pour les trois épaisseurs, c'est clair que la déformation est augmenté avec l'augmentation de la charge. Et la déformation dans la tôle d'épaisseur de 1mm plus petit aux autres.

# **Chapitre III**

## **Simulation**

### III.1 Définition d'I-DEAS :

I-DEAS « Integrated Design Engineering and Analysis Software » est un logiciel de Conception assistée par ordinateur et d'analyse par éléments finis.

Le logiciel I-DEAS est utilisé pour:

- la conception mécanique et structure,
- l'étude des mécanismes (module cinématique),
- les calculs par éléments finis (maillage automatique).

A partir de l'objet virtuel en trois dimensions "3D", les plans de définition et de fabrication sont générés en deux dimensions "plans 2d" et les nomenclatures. Les plans en deux dimensions 2D peuvent être exportés en dxf pour permettre leur exploitation par les sous-traitants (usinage, chaudronnerie etc...). Les objets en trois dimensions 3D volumiques générés peuvent être exportés le cas échéant en .STEP ou .IGES pour insertion dans des ensembles sous Inventeur ou autre logiciel de CAO.

### III.2 Type d'élément de maillage dans I-DEAS :

L'élément choisi est un élément triangulaire trois nœuds en déformation plane, les hypothèses sont les suivantes, un encastrement aux côtés AB et CD tandis que les côtés AC et BD sont libres. Une charge est répartie au centre de l'éprouvette selon un cercle de diamètre 60 mm .

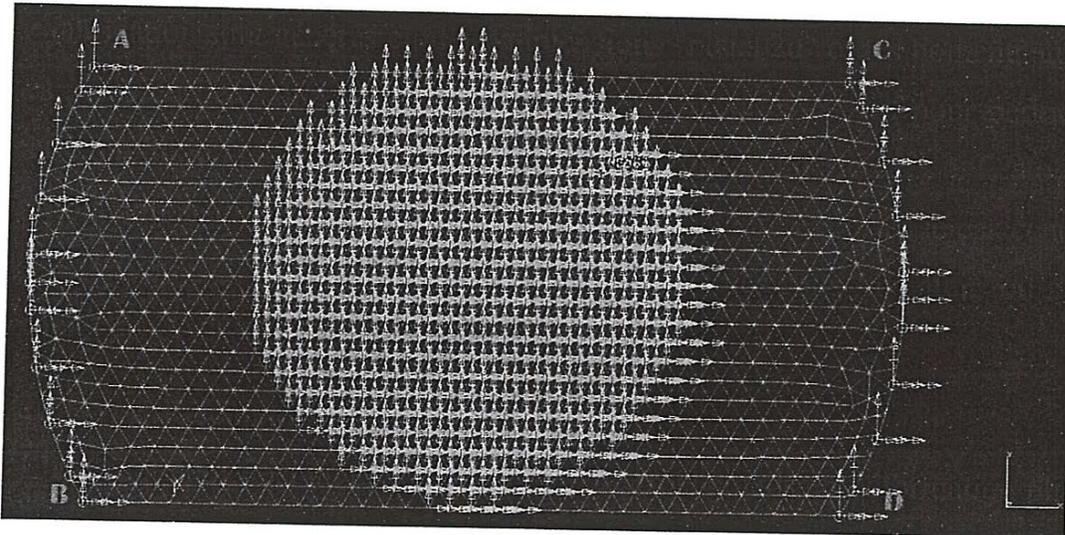


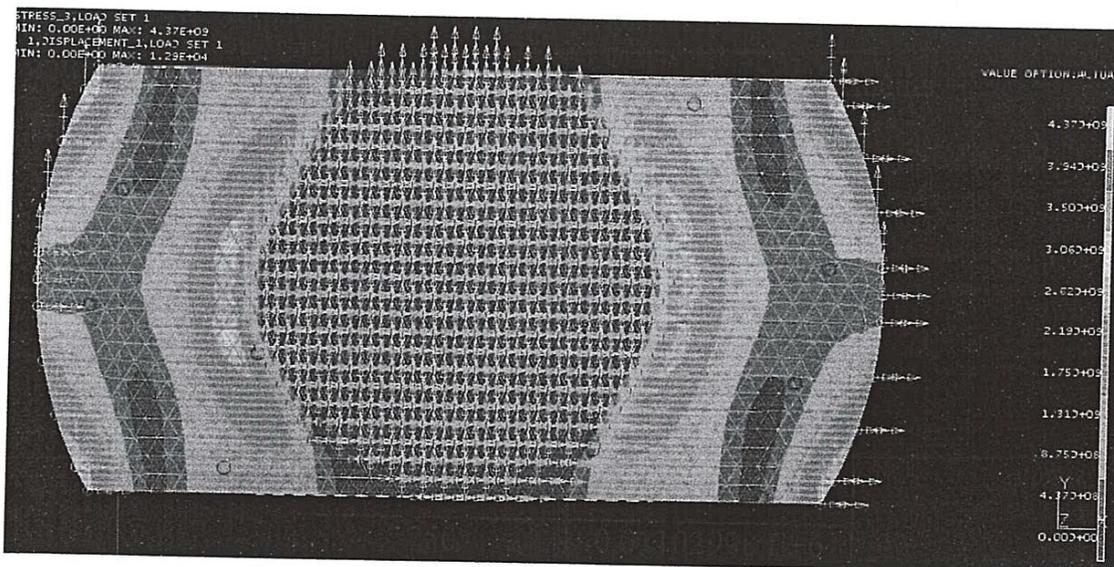
Fig. 54 : Maillage de l'éprouvette

L'élément choisi est un élément triangulaire à 3 nœuds, le maillage automatique a généré une table de connectivités de 1756 éléments.

### III.3 Les résultats de la simulation numérique :

#### Tôle d'épaisseur 0.5 mm :

Charge (daN)	Déformation
250	0,00390087 E+6
500	0,00727756 E+6
750	0,01102998 E+6
1000	0,01554159 E+6



**Fig. 55 :** Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.5 mm  
(Charge maxi 250 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $3.06 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés du serre flan ( $2.62 \text{ E}+09$ ) par contre sur la partie du milieu de la section sous serre flan elle est de l'ordre ( $4.37 \text{ E}+08$ ).

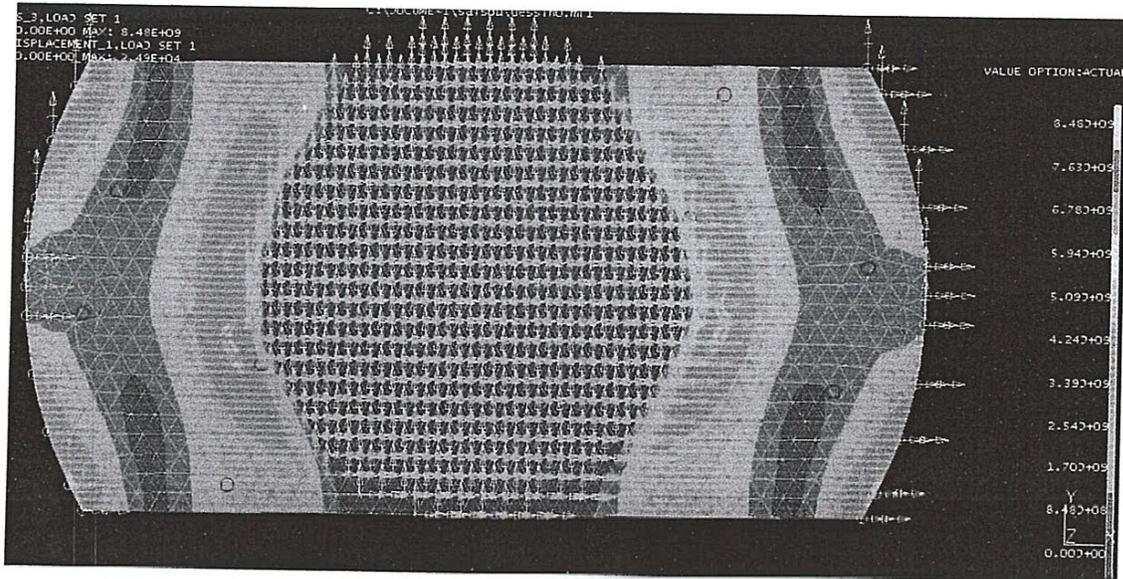


Fig. 56 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.5 mm  
(Charge maxi 500 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $5.94 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés du serre flan tandis qu'au milieu elles varient uniformément jusqu'aux valeurs cités sur les deux extrêmes de la surface en porte à faux.

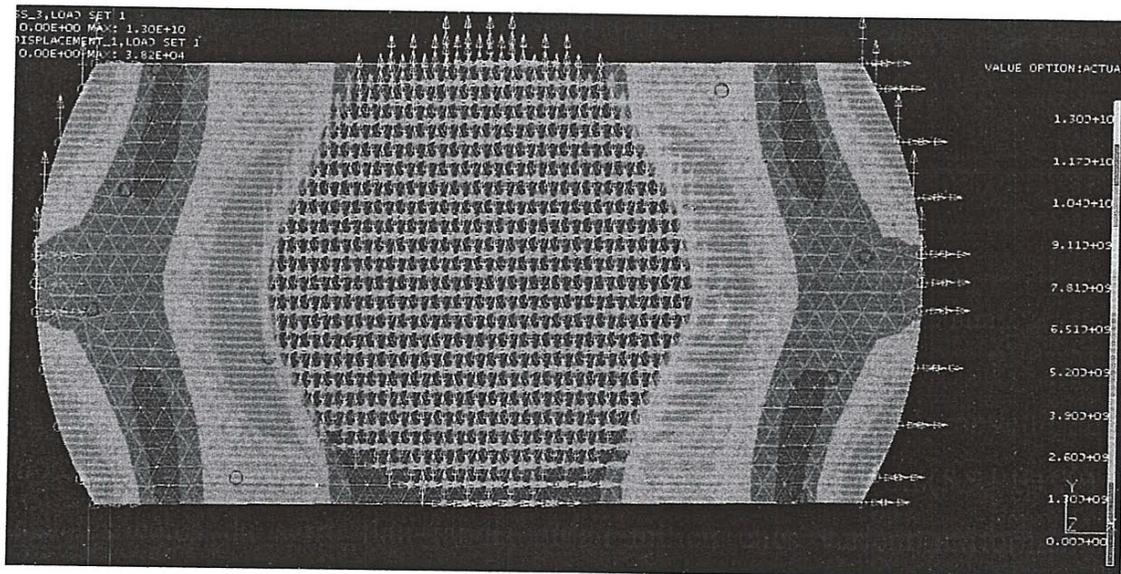


Fig. 57 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.5 mm  
(Charge maxi 750daN)

Les iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $9.11 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés du serre flan et tandis que sur la partie du milieu de la section sous serre flan elle est de l'ordre ( $1.30 \text{ E}+09$ ).

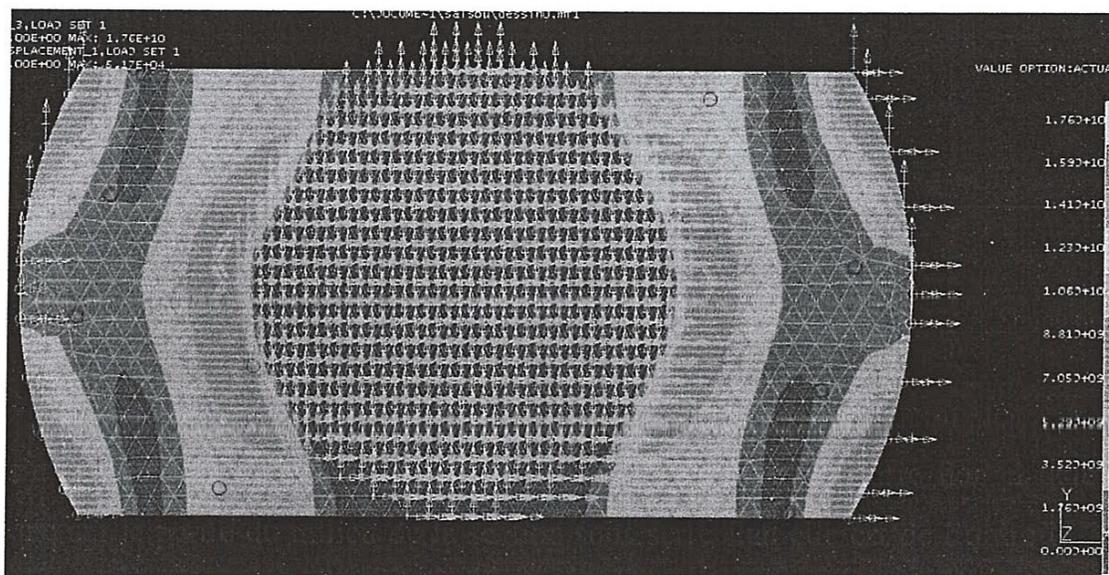
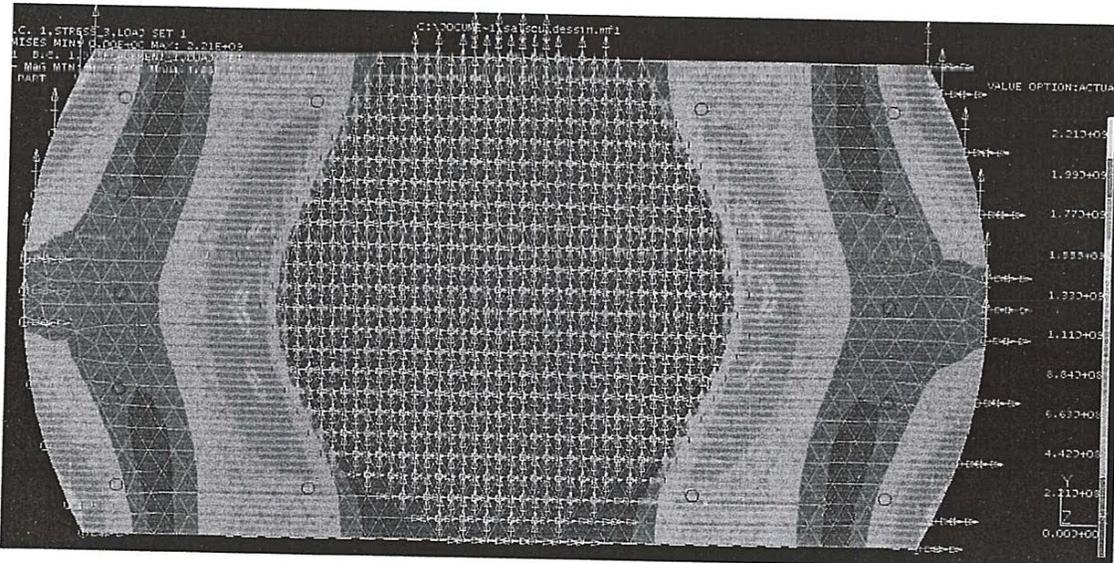


Fig. 58 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.5 mm  
(Charge maxi 1000 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous remarquons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $1.23 \text{ E}+09$ ) et sur côtés de la serre flan ( $1.23 \text{ E}+09$ ) tandis qu'au milieu de la surface en porte à faux elle est de l'ordre de ( $1.76 \text{ E}+09$ ).

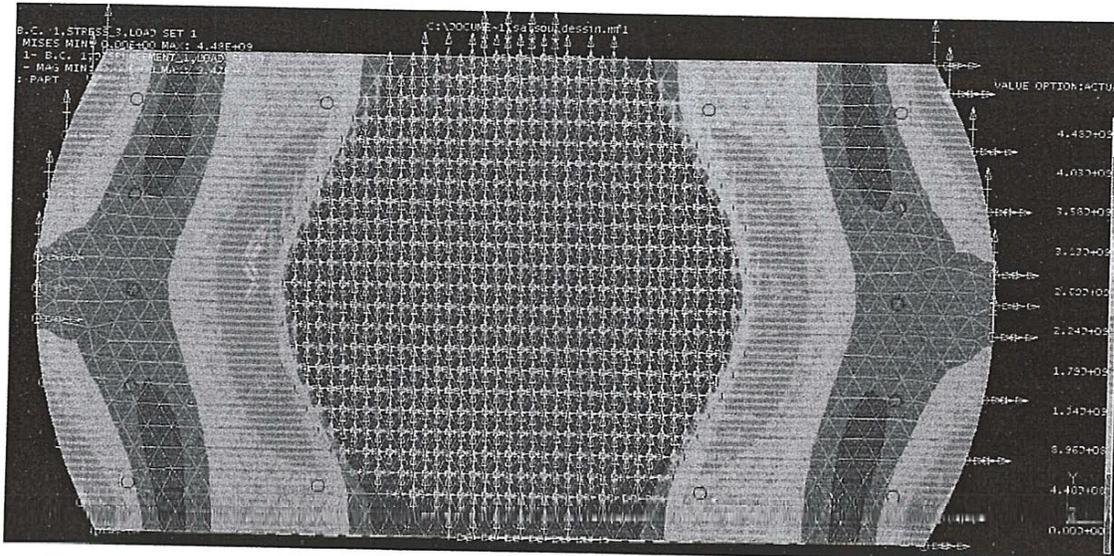
**Tôle pour épaisseur 0.7 mm :**

Charge	Déformation
250	0,0019415 E+6
500	0,0039275 E+6
750	0,0057350 E+6
1000	0,0079932 E+6



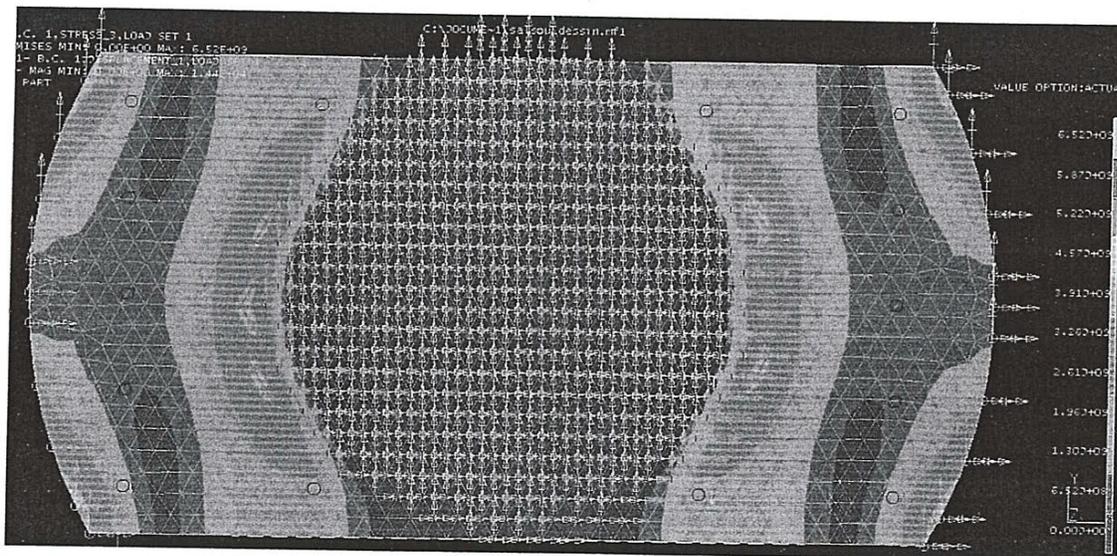
**Fig. 59 :** Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.7mm  
(Charge maxi 250 daN)

Les iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $1.55 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés de la serre flan tandis qu'au milieu de la surface en porte à faux elle est de l'ordre de ( $6.63 \text{ E}+08$ ).



**Fig. 60 :** Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.7 mm  
(Charge maxi 500 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la partie du milieu de la section sous serre flan et sont de l'ordre ( $4.48 E+08$ ).



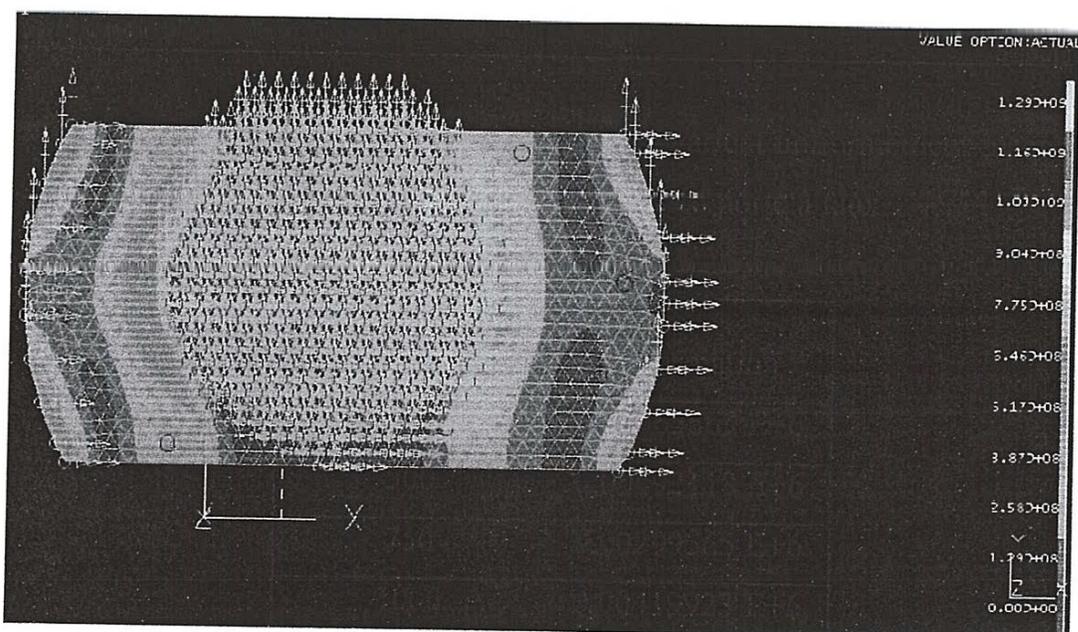
**Fig. 61 :** Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 0.7 mm  
(Charge maxi 750 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $4.57 E+09$ ) et

sur côtés du serre flan tandis qu'au milieu elles varient uniformément jusqu'aux valeurs cités sur les deux extrêmes de la surface en porte à faux.

**Tôle pour épaisseur 1 mm :**

Charge (daN)	Déformation
250	0,00162669 E+6
500	0,00192118 E+6
750	0,00299565 E+6
1000	0,00419923 E+6



**Fig. 62 :** Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 1mm  
(Charge maxi 250 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $9.04 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés du serre flan ( $5.46 \text{ E}+09$ ) sur la partie du milieu de la section sous serre flan elle est de l'ordre de zéro (0).

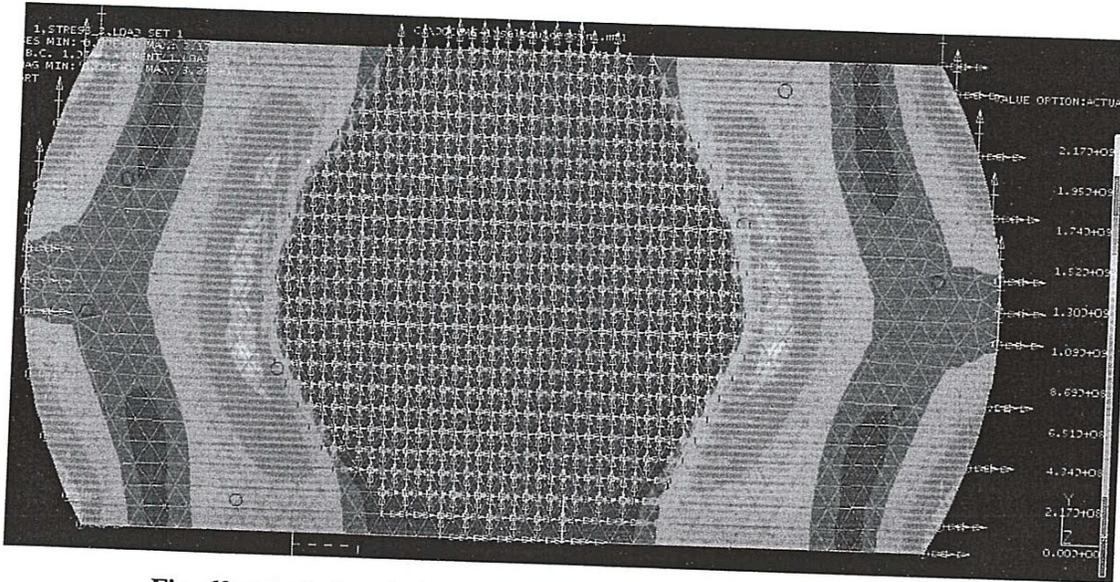


Fig. 63 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 1mm  
 (Charge maxi 500 daN)

Pour la distribution des iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette nous notons qu'elles sont maximales sur la surface du côté du poinçon et sur les côtés de la scrré flan ( $1.52 \text{ E}+09$ ).

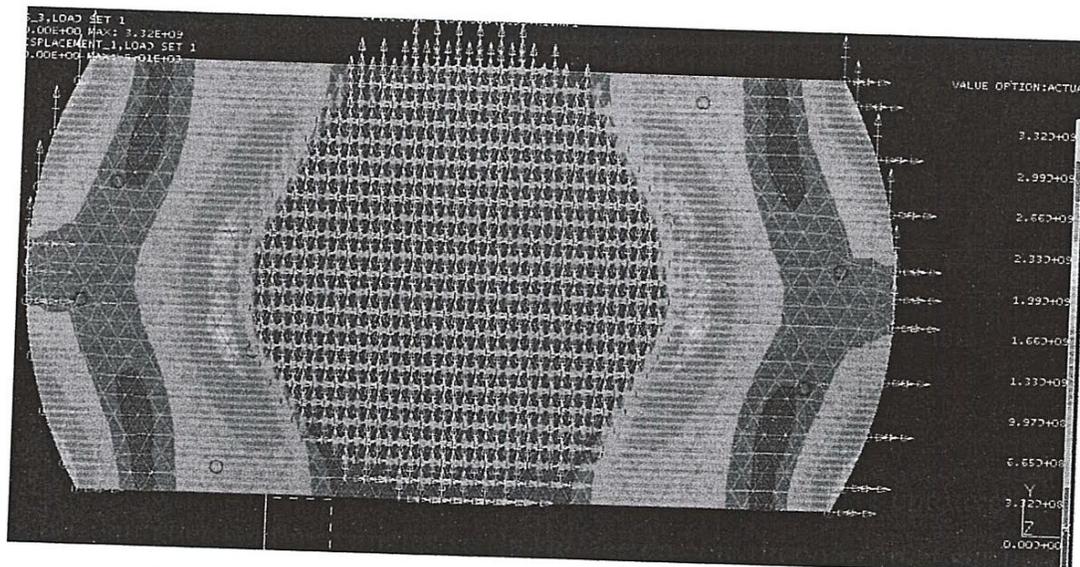


Fig. 64 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 1mm  
 (Charge maxi 750 daN)

Les iso valeurs des contraintes sur l'éprouvette sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $2.33 \text{ E}+09$ ) tandis que sur les côtés de la serre flan reste-la même.

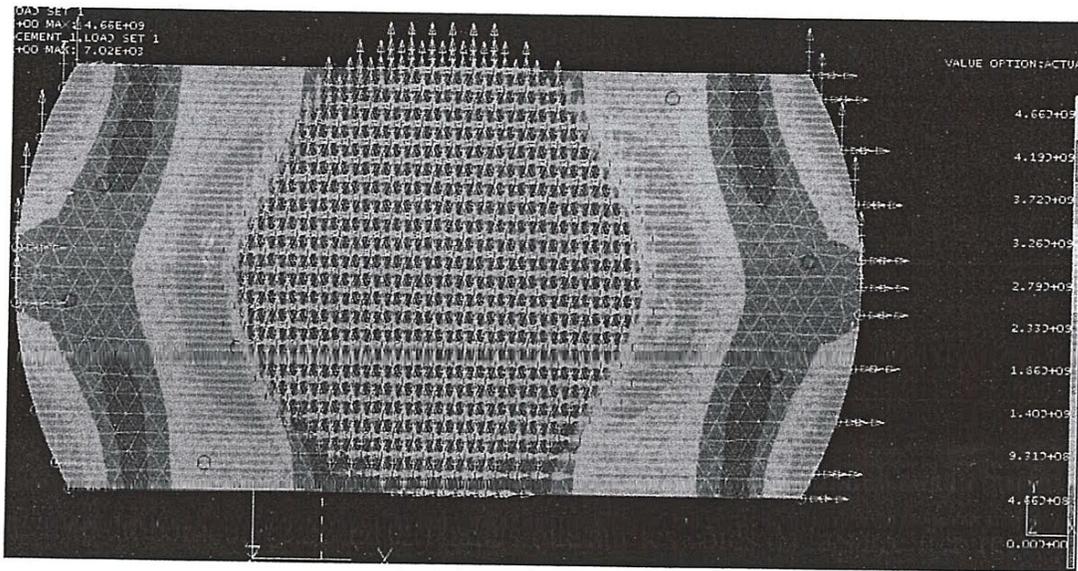


Fig. 65 : Evolution de la contrainte sur l'éprouvette d'épaisseur 1mm  
(Charge maxi 1000 daN)

Les valeurs des contraintes sur l'éprouvette sont maximales sur la surface du côté du poinçon ( $3.26 \text{ E}+09$ ) et sur les côtés de la serre flan ( $2.33\text{E}+09$ ).

### III.4 Comparaison :

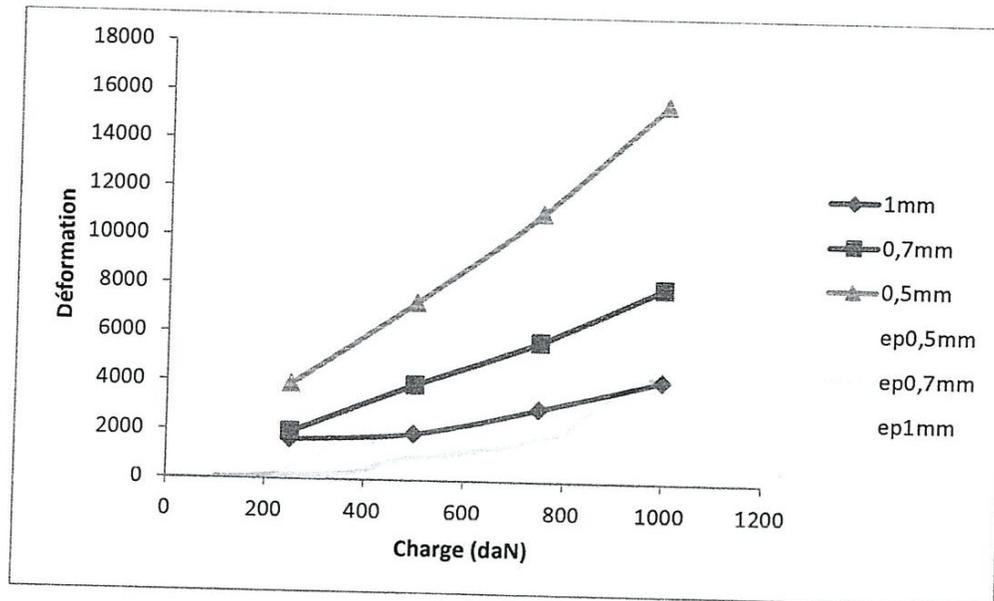


Fig. 66 : Courbe de déformation (0.5mm ,0.7mm ,1mm)

La comparaison des résultats numériques montre qu'ils sont en deçà des valeurs expérimentales surtout pour l'éprouvette d'épaisseur 1 mm pour celle de 0.7 mm et 0.5 mm, les résultats numériques peuvent être valides par l'expérience.

La remarque essentielle qu'on tire de cette validation est que la simulation numérique est valable beaucoup plus pour les tôles de faibles épaisseur qui ont les caractéristiques d'emboutissabilité les plus élevés.

# **Conclusion**

## **Conclusion :**

Nous avons dans ce travail de mettre en exergue l'influence de certains paramètres au cours d'une opération d'emboutissage en utilisant un seul matériau (celui du commerce) avec différentes épaisseurs ou nous avons essayé de voir l'amincissement de la tôle sur différents points de l'éprouvette surtout au centre de la parte entre le poinçon et la matrice ce que nous appelons la partie en porte à faux pour cela nous avons réalisé une première partie expérimentale en utilisant le dispositif d'emboutissage réalisé par S.Ellagoune et M.Boivin et en simulant la tôle d'emboutissage à une pièce rectangulaire et ceci en utilisant l'extensométrie par jauges de déformations pour mesurer la déformation au centre, biensûr avec l'acquisition des caractéristiques mécaniques grâce à la Machine de Traction Universelle HOYTON-S-L. de capacité de charge 100 KN, assistée par ordinateur munie d'un logiciel appelé HOYWIN, la mesure de l'épaisseur réalisé par le mesureur d'épaisseur DM 4DL par ultrasons relié à un microordinateur de type PC à l'aide d'une carte d'acquisition de données et géré par le logiciel Ultramate de communication et de gestion des données stockées dans le mesureur d'épaisseur. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel I-DEAS de Conception assistée par ordinateur et d'analyse par éléments finis ont été validés par ceux obtenus à l'aide des jauges de déformation ou nous avons montré la corrélation existante pour les trois types d'épaisseurs aussi nous avons pu montrer que l'éprouvette s'amincit plus du côté poinçon que celui du côté du serre flan, les courbes de convection H (S1, S2 ou S3) on note que la convection diminue du côté de la tôle testée aux positions 20 mm et 50 mm et augmente dans le milieu de la tôle position 30 mm et ceci pour les différentes épaisseurs. Tandis que les dimensions de la tôle après déformantion (longueurs L1, L2, L3) de la tôle déformé pour épaisseurs (1mm, 0.7mm, 0.5mm) sont les mêmes dans les trois positions 60mm, 30mm ou 0mm. Pour la courbe de la hauteur (h) pour les épaisseurs (0.5mm, 0.7mm, 1mm) elle diminue si l'épaisseur augmente.

Pour que l'étude soit complète il faut avoir différentes nuances de matériaux avec différentes catégories à savoir les aciers d'emboutissage, aciers à dispersoïdes ou à haute résistance ou l'on assiste actuellement à leur prolifération en raison de la sécurité plus accrue de ces derniers et pourquoi pas aussi les matériaux composites ou ceux en nid d'abeilles avec différentes épaisseurs

# **Références Bibliographique**

## Référence Bibliographique

- [1] [<http://www.slideshare.net/saded/emboutissage-12067189>].
- [2] [<http://michel.baehrel.pagesperso-orange.fr/TS1CPI/Expose/Exposes%202005%202006/Emboutissage%20formage%20par%20explosion%20magnetoformage.pdf>].
- [3] Dominique FRANÇOIS, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, essais mécaniques des métaux, essais d'aptitude à la mise en forme, M-125.
- [4] Tze-Chi Hsu<sup>+</sup>, Chan-Hung Chu, A finite-element analysis of sheet metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology 54 (1995) 70-75.
- [5] I. Dejmal, J. Tirosh\*, A. Shirizly, L. Rubinsky, On the optimal die curvature in deep drawing processes, International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002) 1245–1258.
- [6] Mark Colgan, John Monaghan, Deep drawing process: analysis and experiment, Journal of Materials Processing Technology 132 (2003) 35–41.
- [7] Z. Kampuš, K. Kuzman, Experimental and numerical (FEM) analysis of deep drawing of relatively thick sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, 34 (1992) 133-140.
- [8] S. Natarajana, S. Venkataswamyb, P. Bagavathiperumala, A note on deep drawing process: numerical simulation and experimental validation, Journal of Materials Processing Technology 127 (2002) 64–67.