

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : Fabrication mécanique et productique

PAR:

HAMIDOU FARID

SADOUNE THANINA

**Thème**

---

Simulation du procédé d'emboutissage en utilisant un code de calcul

---

Soutenu le 01/07/2019 devant le jury composé de:

Mlle. BOUZIDI Safia

Présidente

Melle. HIMED Lynda

Rapporteur

Mr. BOUTAANI

Examineur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019**

# Remerciements

---

*Nous tenons à remercier tout d'abord notre encadreur, mademoiselle **HIMED Lynda** pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

*Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants du département de Génie Mécanique de l'université de BEJAIA, qui ont contribué à notre formation.*

*A tous nos enseignants qui nous ont initiés aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect !!!*

*Merci à vous tous...*

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents pour leur foi en moi, leur encouragement et amour qui m'a poussé vers l'avant, des bougies qui s'enflamment pour m'éclaircir le chemin de la vie.*

*A mes très chers grands parents (Salem, Zouina, Aicha) je vous souhaite une longue vie*

*A ma sœur Lili et mon frère Syphax je vous souhaite un avenir radieux et plein de réussite*

*A mon cher cousin Anouar je te souhaite que de bonheur et de réussite dans ta vie*

*A toutes mes chères copines qui m'ont créé un milieu d'ambiance et de travail*

*\* Zakia, Gouraya, Tamazight, Katia, Nadia, Hanane, Aziza, Katia, Thiziri,\**

*\*Saadia, warda, Sarah\**

*A mes chers Amis qui m'ont aidé*

*\*\*Hamza, Rahim, Mohamed, Debchuche, Massi, Fatah, Mokran, Nassim, Adel, Achour \*\**

*A la personne qui a été à mes côtés et qui ma supporter durant ce travail*

*\*\*\* Walid. \*\*\**

*A tous les étudiants de la promotion 2018/2019 option FMP en particulier*

*\*\* Fahem, Larbi, Hicham et mon binôme Farid\*\**

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.*

**THANINA**

# *Dédicace*

---

## Liste des figures

### Chapitre I Généralité sur l'emboutissage

FigureI.1.Principaux procédé de mise en forme des matériaux métalliques.....	4
FigureI.2.Procédé d'emboutissage.....	5
FigureI.3.Procédé d'emboutissage avec freinage de tôle sous serre flan.....	5
FigureI.4.Description du procédé d'emboutissage .....	6
FigureI.5.Procédé d'emboutissage phase0 .....	7
FigureI.6.Procédé d'emboutissage phase1 .....	7
FigureI.7.Procédé d'emboutissage phase2.....	7
FigureI.8.Procédé d'emboutissage phase3.....	8
FigureI.9.Procédé d'emboutissage phase4.....	8
FigureI.10.Outils d'emboutissage d'aile d'une voiture .....	9
FigureI.11.Ligne de presse d'emboutissage .....	10
FigureI.12.Le procédé d'emboutissage en chiffre .....	10
FigureI.13.Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage.....	12
FigureI.14.Emboutissage en expansion.....	12
FigureI.15.Emboutissage en rétreint.....	13
FigureI.16.Retour élastique.....	15
FigureI.17.Modes de déformation dans le repère des déformations principales.....	17
FigureI.18.Emboutissage en expansion pure Erichsen.....	18
FigureI.19.Emboutissage renversé.....	20
FigureI.20.Emboutissage de pièce demi sphérique.....	21
FigureI.21.Emboutis rectangulaires.....	21

## Chapitre II étude des paramètres d'emboutissage

FigureII.1.Variation de l'arrondi sur la matrice .....	26
FigureII.2.Ajout de 2 à 3 mm pour détournage .....	29
FigureII.3.Etats de contrainte et déformation d'un élément fini de tôle mince.....	31
FigureII.4.Rupture(a), retour élastique(b), et plissement(c)et(d).....	33
FigureII.5.Principe de la segmentation élastique du serre flan.....	37
FigureII.6.Géométrie d'un jonc de serrage .....	38
FigureII.7.Courbe de traction.....	40
FigureII.8.Loi de frottement modèle de coulomb.....	41
FigureII.9.Régularisation de la loi de frottement.....	42
FigureII.10. Modèles de frottement: Coulomb, Tresca.....	43

## Chapitre III la simulation numérique

FigureIII.1.Desente du serre flan.....	47
FigureIII.2.Desente de poinçon sur la tôle .....	47
FigureIII.3.Configuration initial de la tôle avec ABAQUS.....	48
FigureIII.4.Etirage de la tôle par ABAQUS.....	48
FigureIII.5.Etape finale d'étirage de la tôle .....	48
FigureIII.6.Romontée du poinçon .....	49
FigureIII.7.Dégagement du serre flan.....	49
FigureIII.8.Dégagement de la matrice .....	50
FigureIII.9.Distribution des contraintes .....	50
FigureIII.10.Distribution des contraintes S11.....	51
FigureIII.11.Distribution déformations .....	52
FigureIII.12.Un autre résultat numérique de la simulation d'emboutissage .....	53
FigureIII.13.Les trois zones de distribution de contrainte .....	53

**LISTE DES TABLEAUX**

TableauI.1. Caractéristiques des différentes catégories des tôles..... 19

TableauI.2. Modes de déformation d'emboutissage..... 32

**Chapitre I** Généralité de procédé d'emboutissage

Introduction générale.....	1
I.1. Généralités sur la mise en forme des métaux.....	4
I.2.Généralités sur l'emboutissage.....	4
I.3.Modes d'emboutissage.....	11
I.3.1.Emboutissage en expansion.....	12
I.3.2.Emboutissage en retraits.....	12
I.4.L'emboutissage en température.....	13
I.4.1 L'emboutissage à froid.....	13
I.4.2.L'emboutissage à chaud.....	13
I.5.Machines utilisées en emboutissage.....	13
I.6.Difficultés du procédé d'emboutissage .....	14
I.7.Mise au point des opérations d'emboutissage.....	14
I.8.Outillage.....	14
I.8.1.Caractéristique et importance des dimensions des outils.....	15
I.8.2.Rayon du poinçon.....	16
I.8.3.Rayon de matrice.....	16
I.8.4.Jeu entre poinçon et matrice .....	16
I.8.5.Serre flan.....	16
I.9.Matériaux et forme d'emboutis.....	17
I.9.1.Comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage.....	17
I.9.1.1.Les aciers.....	18
I.9.1.2.Les alliages non ferreux.....	19
I.9.2.Forme des pièces emboutis.....	20
I.9.2.1.Forme cylindrique.....	20
I.9.2.2.Forme conique.....	20
I.9.2.3.Forme demi sphérique.....	20

---

I.9.2.4. Forme rectangulaire.....	21
I.10. Conclusion.....	21
<b>Chapitre II</b> étude des paramètres d'emboutissage	
II .1. Introduction.....	24
II.2. Caractérisation en emboutissage.....	24
II.3. Aspects métallurgiques d'emboutissage.....	24
II.4. Aspects opératoires.....	24
II.4.1. Les paramètres liés à la presse.....	25
II.4.1.1. Le jeu entre le poinçon et la matrice.....	25
II.4.1.2. Le rayon sur la matrice.....	25
II.4.1.3. Arrondi sur le poinçon.....	27
II.4.1.4. La vitesse d'emboutissage.....	27
II.4.1.5. La pression de serre flan.....	27
II.4.1.6. L'effort d'emboutissage.....	28
II.4.2. Les paramètres liés à la tôle.....	28
II.4.2.1. La taille du flan.....	28
II.4.2.2. La lubrification.....	29
II.5. Tolérances dimensionnelles.....	30
II.6. Etude des contraintes et déformations dans l'emboutissage.....	30
II.7. Influence de la structure des tôles minces sur leur emboutissabilité.....	32
II.7.1. Influence de la taille des grains.....	32
II.7.2. Influence du coefficient d'érouissage.....	33
II.8. Principaux défauts rencontrés en emboutissage.....	33
II.9. Principaux paramètres du procédé d'emboutissage.....	36
II.9.1. Forme du flan initial.....	36
II.9.2. Effort du serrage.....	37
II.9.3. Force de retenue de joncs.....	38

II.10.loi de comportement.....	39
II.10.1.Ecrouissage.....	39
II.11.Les lois de frottements utilisées dans les simulations numériques.....	40
II.11.1.Modèle de coloumb.....	41
II.11.2.Modèle de tresca.....	42
II.12.Les critères de la plasticité.....	43
II.12.1.Critères de Von mises.....	43
II.13.Conclusion.....	43

**Chapitre III** la simulation numérique

III.1 Introduction.....	45
III.2.La simulation numérique de procédé d’emboutissage.....	45
III.3.Description de modèle .....	46
III.3.1.Donnés géométriques.....	46
III.3.2.Donnés mécaniques.....	46
III.3.3.La modélisation numérique.....	46
III.4.Les étapes d’emboutissage.....	47
III.5.La distribution des contraintes.....	50
III.6.La distribution des déformations.....	52
III.7.Comparaison des résultats .....	52
III.8.Conclusion .....	54
Conclusion générale .....	56

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'emboutissage est un procédé de mise en forme des matériaux métalliques en feuilles minces. Cela consiste à donner une dimension spatiale à une feuille métallique initialement plane. Ce procédé permet d'obtenir des pièces de formes complexes, le plus souvent non développables, et nous pouvons le retrouver très utilisés dans la fabrication de l'électroménager, de l'emballage métallique, de l'aéronautique et surtout de l'automobile. La réussite d'une opération d'emboutissage nécessite la maîtrise de nombreux paramètres liés au type de matériau, à la géométrie des outils et de la tôle, aux conditions opératoires (efforts appliqués, vitesse, lubrification). Elle requiert une connaissance approfondie des modes de sollicitations que subit le métal. Il en résulte que le contrôle de l'écoulement de la matière par l'intermédiaire du serre-flan, est un art nécessitant des personnes de métier très qualifiées afin d'empêcher la formation des plis et/ou des déchirures de la pièce, en ajustant localement et en fonction du temps la pression de serrage. Le glissement de la tôle peut être contrôlé en utilisant soit des jongs de retenue ou un serre-flan déformable voire flexible.

Notre objectif principal est d'étudier et montrer par une simulation numérique d'emboutissage en utilisant un code de calcul la distribution des contraintes et l'évolution des déformations dans des différentes zones de la tôle.

Le déroulement de notre travail se divise en trois chapitres

Nous commençons par un premier chapitre présentant les procédés de la mise en forme, ensuite le principe d'emboutissage et des généralités sur les modes d'emboutissage, les machines utilisées et les outils d'emboutissage et ce chapitre sera finalisé par une présentation des matériaux emboutissables et les formes embouties.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des essais et de la mesure de déformation en emboutissage, ensuite, une description de l'aspect métallurgique et de l'aspect opératoire il s'agit des paramètres liés à la presse et liés à la tôle. Comme nous présentons aussi dans ce chapitre les défauts d'emboutissage qui se résument (retour élastique, striction, et le plissement). Suivi des lois de comportements.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique de procédé d'emboutissage en utilisant un code de calcul. Suivi d'une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LE**  
**PROCÉDÉ**  
**D'EMBOUTISSAGE**

## I.1 Généralités sur les procédés de mise en forme des métaux

Il existe trois voies principales de mise en forme selon l'état de départ du matériau métallique (le moulage, le façonnage et le frittage). La Figure (I.1) récapitule les principaux procédés de mise en forme des métaux utilisés actuellement. Parmi les techniques de formage sans enlèvement de matière des métaux en feuilles on trouve le procédé d'emboutissage. Il est l'un des procédés de mise en forme des tôles minces le plus ancien et le plus répandu dans le milieu industriel. [1]

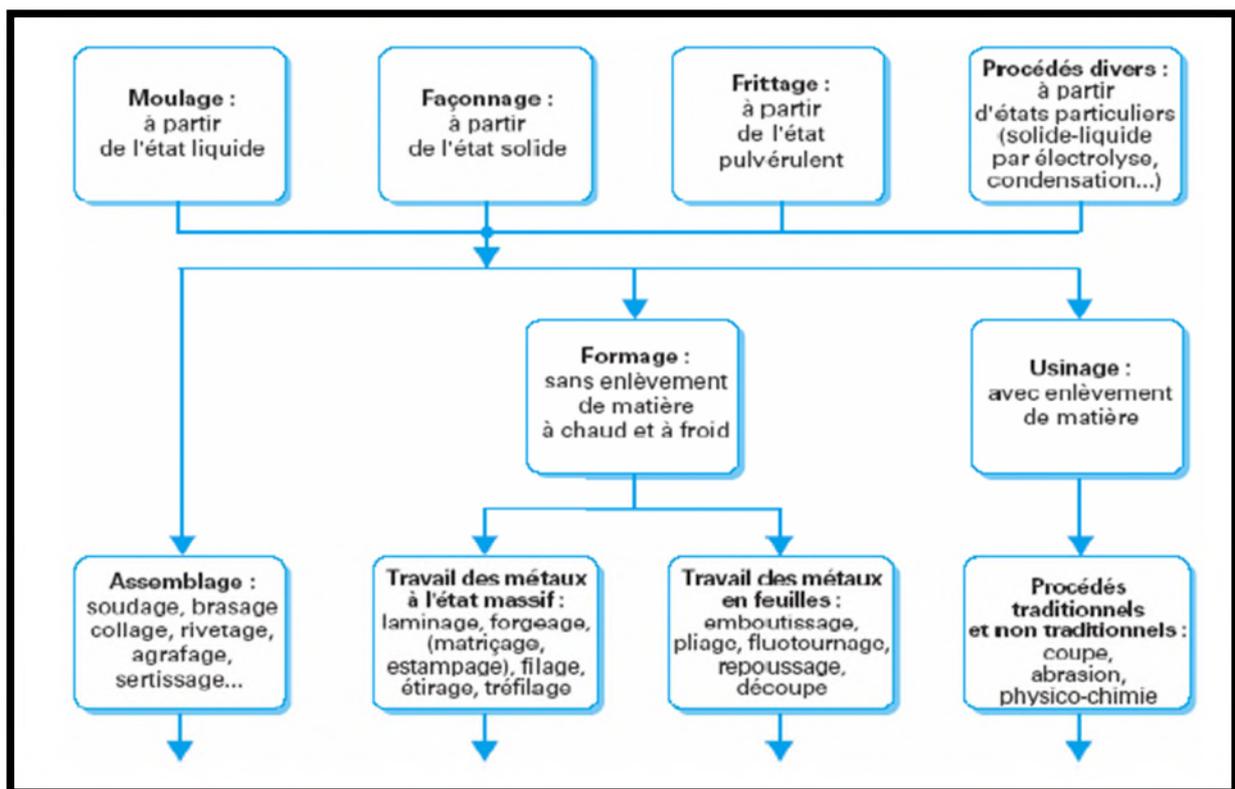
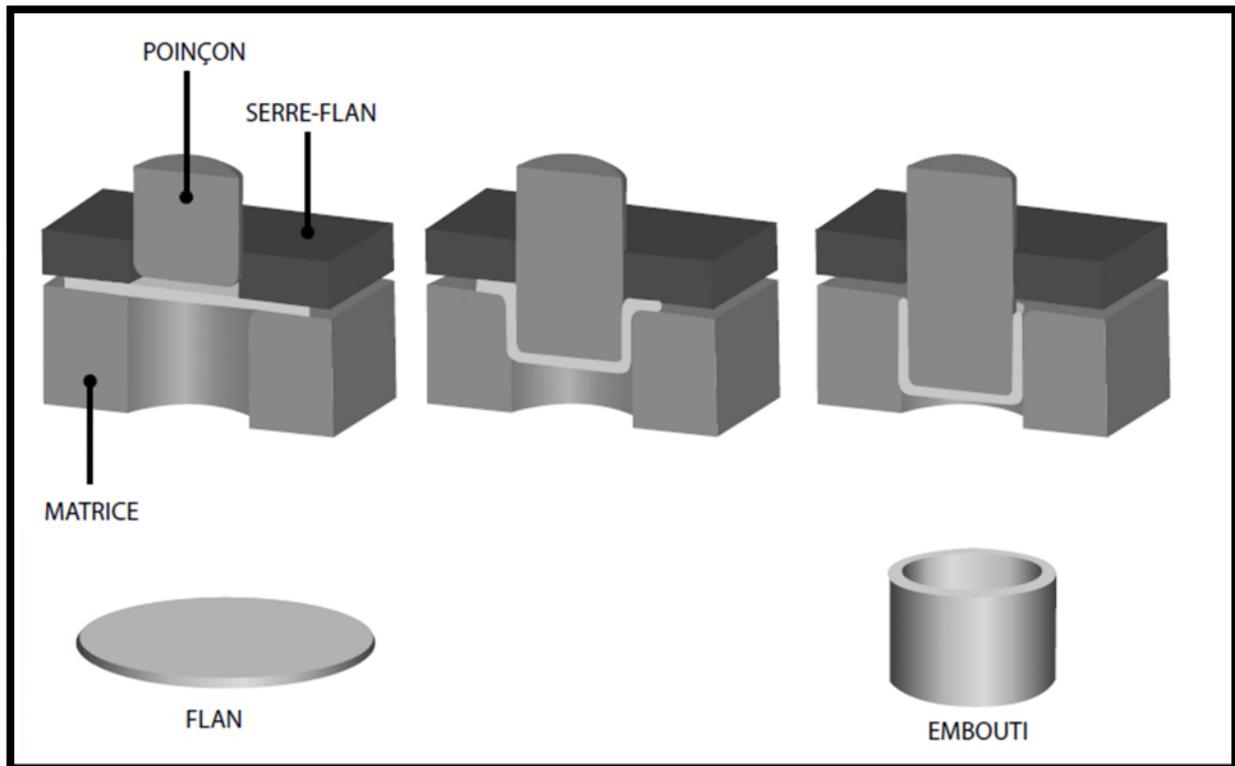


Figure. I.1. Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques [1]

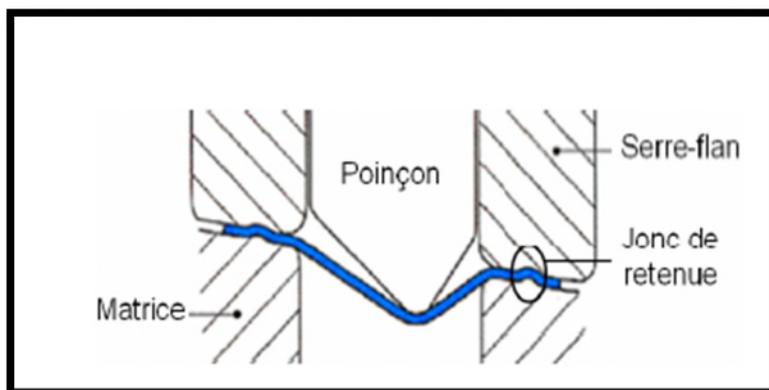
## I.2. Généralités sur l'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage qui consiste à transformer une tôle plane en une forme creuse de géométrie plus ou moins complexe. Ce procédé nécessite une presse hydraulique ou mécanique équipée d'un outillage constitué essentiellement par un poinçon et une matrice. En général, on ajoute un serre-flan pour prévenir le plissement de la tôle en périphérie du poinçon. Le métal subit une déformation permanente lorsque la tôle est entraînée par le poinçon dans la matrice. On nomme « embouti » le corps creux avec une paroi plus ou moins cylindrique et un fond, obtenu par emboutissage.[2]

La figure suivante montre trois séquences de réalisation d'un embouti à partir d'un flan prédécoupé dans une tôle



**Figure I.2.** Procédé d'emboutissage[2].

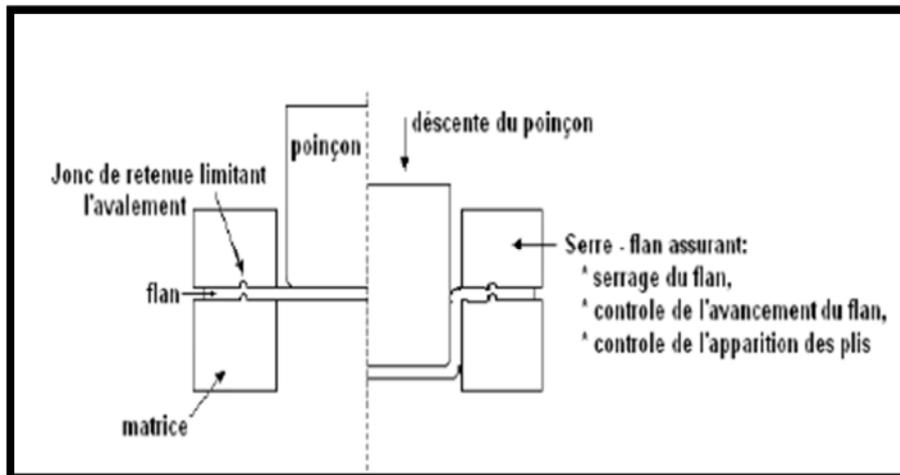


**Figure I.3.** Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan

Les déformations engendrées par l'emboutissage conduisent en général à des modifications de l'épaisseur du flan, le volume total restant néanmoins constant. Du point de

vue géométrique, l'emboutissage transforme donc une surface plane ou préformée (mais développable) en une surface non développable. Quatre étapes apparaissent au cours de l'opération d'emboutissage :

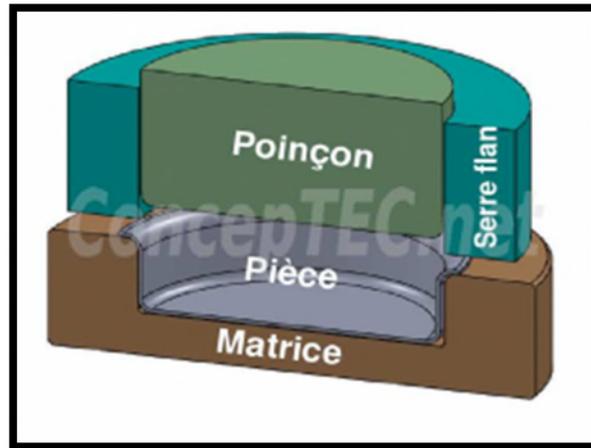
- Le positionnement du flan sur la matrice et les phénomènes de gravité qui peuvent en dérouler,
- Le serrage du flan par serre- flan,
- L'emboutissage proprement dit obtenu par descente du poinçon,
- L'ouverture de la presse et l'éjection de l'embouti.



**Figure I.4** : Description du procédé d'Emboutissage.

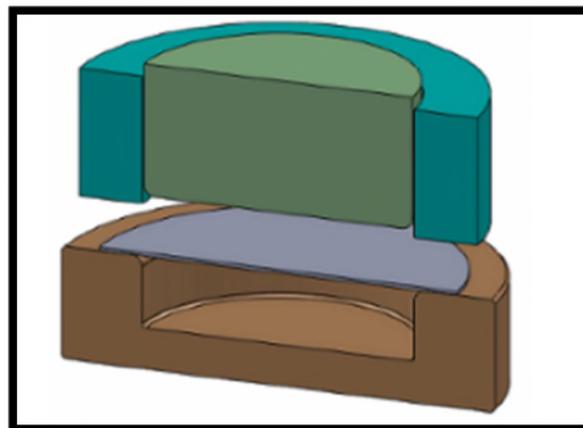
L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse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

**Phase 0** : poinçon et serre-flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice



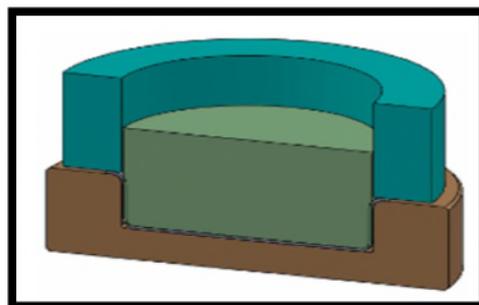
**FigureI.5.** procédé d'emboutissage phase0

**Phase 1 :** le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de fluer.



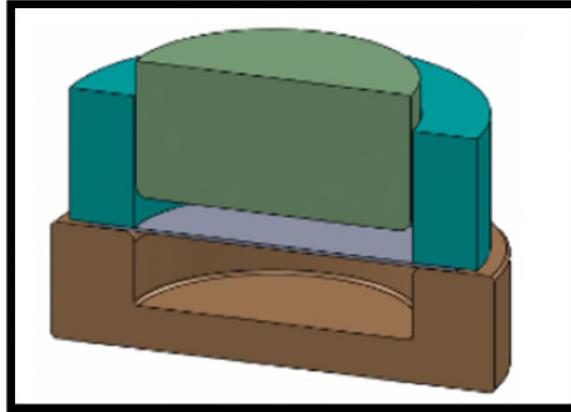
**FigureI.6.** procédé d'emboutissage phase1

**Phase 2 :** le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice. Le flan peut glisser entre le serre-flan et la matrice.



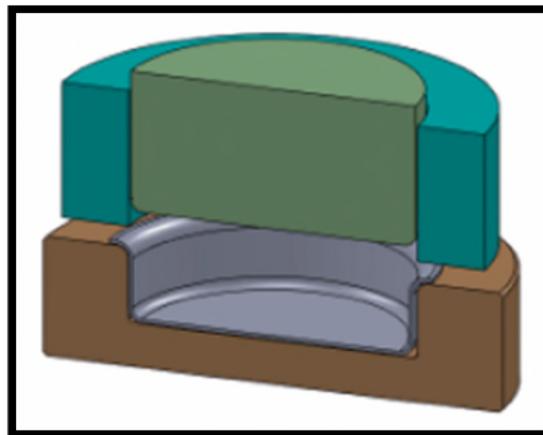
**FigureI.7.** procédé d'emboutissage phase2

**Phase 3** : le poinçon et le serre-flan sont relevés : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).



**FigureI.8.** procédé d'emboutissage phase3

**Phase 4** : on procède au « détourage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles.(essentiellement les parties saisies par le serre-flan).

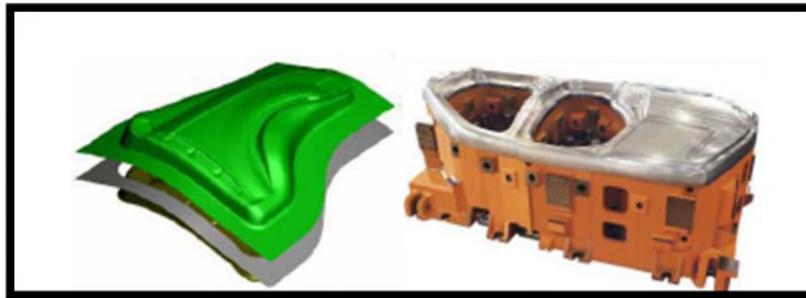


**FigureI.9.** procédé d'emboutissage phase 4

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

L'emboutissage ne plastifie pas entièrement la pièce, une étude de retour élastique est nécessaire pour assurer l'assemblage final.[3]

L'emboutissage a une grande importance industrielle, si l'on se réfère au tonnage des pièces fabriquées. La faible épaisseur des tôles utilisées dans la production, permet un gain important du poids et une économie de la matière. Les pièces obtenues par ce procédé peuvent également avoir une grande rigidité vues leurs formes et leurs conceptions. C'est un procédé qui permet donc un bon rapport rigidité-poids, ce qui est très souhaité et recherché dans l'industrie. C'est grâce à ces avantages que ce procédé trouve une large application. Il est très utilisé dans la fabrication du mobilier métallique, de l'électroménager, de l'emballage métallique, de l'aéronautique et surtout de l'automobile (Figure I.10) (il suffit ici de dire que sur un véhicule, l'emboutissage concerne 500 pièces environ). Un autre avantage très important pour ce procédé : il est très bien adapté au travail en série, un outillage spécial permet d'atteindre des cadences de production d'environ 60 pièces par minute. [4]



**Figure I.10.** Outils d'emboutissage d'aile d'une voiture.[17]

L'opération d'emboutissage peut se faire à froid ou à chaud, par l'intermédiaire d'une presse ou d'une ligne des presses lorsque plusieurs opérations sont nécessaires (Figure I.11)



Figure I.11. Ligne de presses d'emboutissage [17].

D'après une étude du Service des Études et des Statistiques Industrielles en 2004 du Ministère de l'Économie des Finances et de l'Industrie de France, les entreprises travaillant dans le secteur découpage emboutissage, occupent la première place des fournisseurs de pièces et d'équipements automobile, avec 47% des investissements (Figure 12)

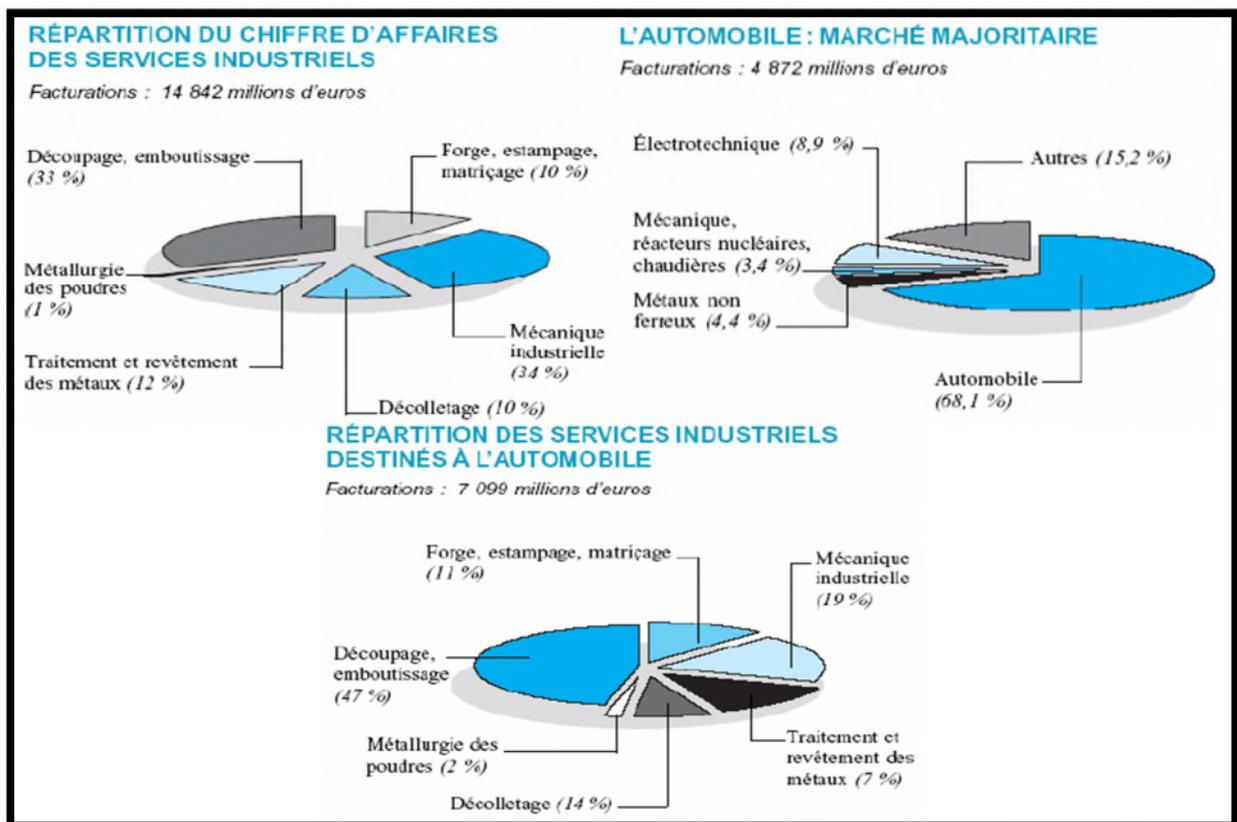


Figure I.12. Le procédé d'emboutissage en chiffres. [17]

A cet égard, les entreprises se tournent de plus en plus vers les innovations du procédé afin d'identifier les technologies clés pour :

- Améliorer la qualité des pièces embouties et la flexibilité des outils ;
- Réduire les coûts de la production ;
- Améliorer la productivité et la compétitivité.

Les principaux paramètres du procédé sont :

- ✓ L'épaisseur initiale de la tôle ;
- ✓ La loi de comportement du matériau et l'anisotropie de ce dernier ;
- ✓ La vitesse du poinçon ;
- ✓ La position du flan initial et le dimensionnement du contour initial ;
- ✓ La force de serrage serre-flan et les coefficients de frottement, ainsi qu'éventuellement la forme et la position de joncs (Figure I.3).[5]

La réalisation d'un emboutissage s'avère donc complexe, et sa réussite est souvent liée à l'expérience. En effet, l'emboutissage se définit, rappelons-le, par une transformation permanente d'une feuille de métal en une forme tridimensionnelle par l'action d'outils.

Ce qui permet de mettre en exergue les aspects suivants :

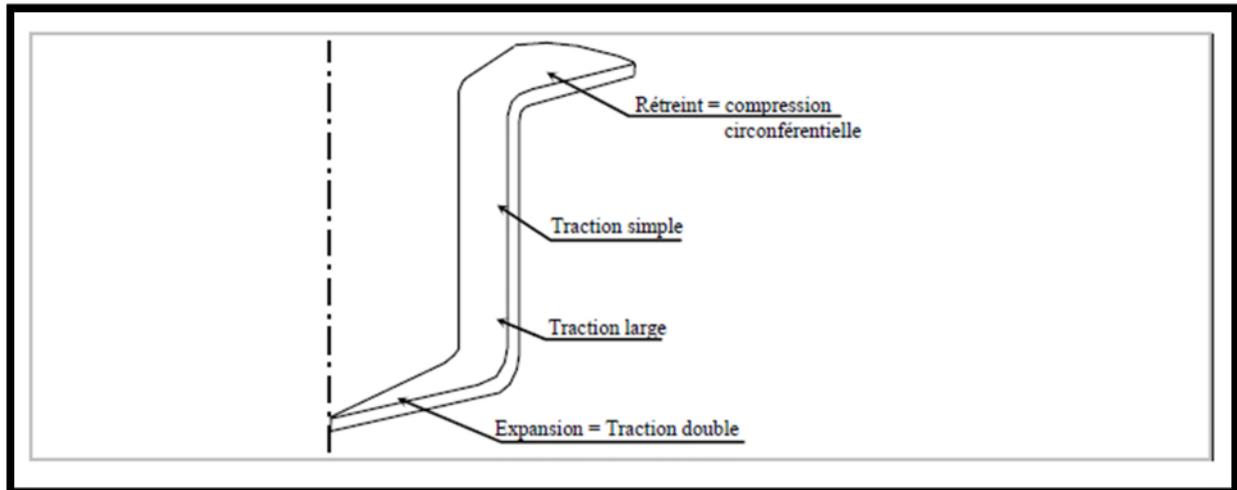
- Les grandes transformations géométriques d'une structure mince ;
- Le comportement élastoplastique anisotrope du matériau ;
- Les contacts et frottements entre les outils et la tôle.

Ainsi, nombreux sont ceux qui, désireux de connaître mieux le processus afin de l'améliorer, ont développés des aides à la conception des outils et autres outils d'analyses et de simulation. Nous pouvons répertorier des méthodes géométriques, expérimentales et analytiques sur des formes simples. Plus proche de nous, l'ordinateur et l'avènement de la méthode des éléments finis, qui ont permis le développement du calcul numérique, ont mené à la création de logiciels permettant la simulation de crashes, via la recherche militaire, et le calcul des structures. A partir de ces codes, des logiciels de simulation numérique d'emboutissage des tôles sont apparus [5].

### **I.3.Modes d'emboutissage**

Lors de la mise en forme de la tôle, deux modes extrêmes de déformation sont possibles :le rétreint et l'expansion. 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 figure I.13, on

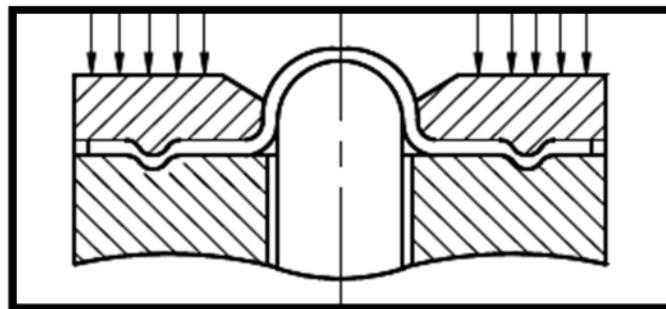
voit apparaître l'expansion et le rétreint ainsi que l'évolution de différents modes de déformation le long de la pièce emboutie.



**Figure I.13 :** Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de Révolution.

### I.3.1. Emboutissage en expansion

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flanc et matrice, si besoin est avec des joncs. La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant, nous disons que nous travaillons en expansion (FigureI.14).[6]



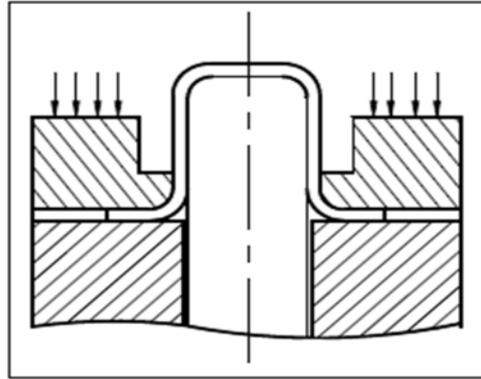
**FigureI.14.** Emboutissage en expansion[6]

### I.3.2. Emboutissage en rétreint

Si la pièce a une forme cylindrique droite (base circulaire ou quelconque) de forte profondeur on laisse glisser le flan entre serre-flan et matrice, la déformation sur le poinçon est limitée au rayon de poinçon, la majeure partie de la déformation se fait par rétrécissement sur la matrice, c'est l'emboutissage en rétreint (FigureI.15).

Une opération d'emboutissage quelconque est la combinaison de ces deux modes .Dans une opération mixte, un des gros problèmes est de régler le glissement sous serre-flan

suffisamment faible pour permettre les déformations et éviter les plis, suffisamment fort pour éviter un étirage trop important qui conduirait à la rupture[6].



**Figure I.15.** Emboutissage en rétreint[6]

## I.4. L'emboutissage en température

### I.4.1. L'emboutissage à froid

Il est réalisé sur des presses mécaniques. L'emboutissage à froid est réservé aux matériaux d'épaisseur inférieure à 6mm (aluminium, aciers inoxydables, laiton, aciers doux (0.2% Cmax)), ce procédé impose, sauf rares exceptions, un outillage double effet. Les emboutis peu profonds ou ne nécessitant pas d'importants efforts de serrage, sont exécutés sur des presses double effet. Le serre-flan applique la tôle sur la matrice pendant toute la durée du travail du poinçon, l'opération terminée, la pièce est dégagée soit à l'aide de l'éjecteur, soit au travers de la matrice[6].

### I.4.2. L'emboutissage à chaud

Il est réalisé exclusivement sur presses hydrauliques. Il est réservé aux matériaux peu ductiles (magnésium, titane, zinc,...), aux emboutissages profonds, et aux tôles de forte épaisseur nécessitant de grands efforts (épaisseur supérieure à 7 mm pour l'acier). Les cadences de production sont inférieures et les aspects de surface sont moins bons, vis-à-vis de l'emboutissage à froid[6].

## I.5. Machines utilisées en emboutissage

Les presses mécaniques travaillant par chocs sont réservées pour les emboutis de faibles hauteurs ( $h < d$ ), et les cadences de production importantes (jusqu'à 400 coups par minute). Les capacités de ces machines peuvent aller de 2 000 à 10 000 kN selon la structure de la machine. Les presses hydrauliques travaillant par pression sont réservées pour les emboutis profonds ( $h > d$ ), ainsi on peut moduler l'effort appliqué sur le flan dans les cas délicats[6].

## I.6. Difficultés du procédé d'emboutissage

Les cadence de production, souvent très intenses (voisines de 100 à 200 pièces /heure, pour les très grosses pièces de carrosserie d'automobiles) font du procédé d'emboutissage, une opération de mise en forme très attractive du point de vue des coûts de production. Pourtant la mise en point des outils d'emboutissage nécessite un savoir-faire que seuls, souvent pour l'instant, les emboutisseurs détiennent. En effet les principales difficultés rencontrées pour obtenir une forme finale correcte sont nombreuses :

- L'état de la surface des tôles doit être parfaitement lisse,
- Les zones de faibles épaisseurs doivent être contrôlées,
- Les plis et les ruptures (par striction) doivent être évités,
- Le retour élastique de la tôle après emboutissage doit être pris en compte.

Les interactions superficielles de la tôle avec les outils ont évidemment une influence sur la qualité de la pièce formée et la maîtrise de l'opération requiert une connaissance au moins qualitative de l'effet des paramètres sur leur intensité. [7]

## I.7. Mise au point des opérations d'emboutissage

La mise au point consiste à déterminer les conditions de formage pour lesquelles la partie utile de la pièce ne comporte aucun défaut marqué en volume : rupture, amincissement local excessif, plis, cloques et d'une manière générale, non-respect des tolérances dimensionnelles, ni en surface : rayure, gripures, perte de revêtement pour les tôles revêtues, etc. Les moyens d'action possibles à mettre en œuvre, concernant le choix :

- de la géométrie et la position du flan,
- de la force de serrage exercée par le serre-flan, et de la position et de la géométrie des jons,
- de la géométrie de l'outil (correction du retour élastique de la pièce),
- du lubrifiant (nature, quantité),
- du matériau de la tôle (le plus souvent en vertu d'un critère expérimental de formabilité),
- de la nature de l'outil, etc.[7]

## I.8. Outillages

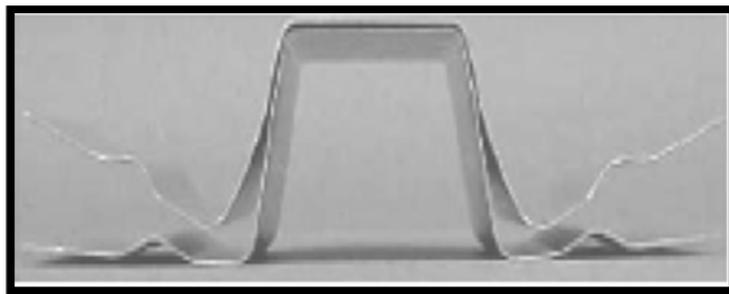
L'emboutissage peut comporter une ou plusieurs opérations dans chacune le flan ou pièce de l'opération précédente est préalablement plaquée contre la matrice par le serre flan. Avec unecertaine force, plus au moins constante puis mise en forme par avancée du poinçon.

L'outillage d'emboutissage se compose généralement de trois éléments :

- un poinçon pour appliquer l'effort d'emboutissage et délimitant le contour intérieur de la tôle,
- une matrice délimitant le contour extérieur de la tôle,
- un serre-flan qui, en pressant la tôle métallique contre la matrice contrôle son écoulement lors de la descente du poinçon

La pénétration du poinçon dans la matrice nécessite un jeu fonctionnel entre ces deux éléments afin d'éviter l'écrasement de la tôle. L'opération d'emboutissage d'une tôle se déroule en deux phases : une phase d'emboutissage et une phase de retour élastique.

La phase d'emboutissage est elle-même composée de deux étapes : la première consiste à faire descendre le serre-flan jusqu'au contact avec la tôle et lui appliquer une pression de serrage plus ou moins élevée. La seconde étape est la descente du poinçon tout en maintenant la pression appliquée sur le serre flan. La phase du retour élastique concerne le retrait des outils et l'extraction de la tôle emboutie. Cette étape consiste à annuler la pression de serrage, retirer le poinçon, enlever le serre-flan et éjecter la tôle hors de la matrice.[7]



**Figure I.16.** Retour élastique [7]

### **I.8.1. Caractéristique et importance des dimensions des outils**

L'outil qui exécute une opération dans la gamme de fabrication d'une pièce peut être monté seul ou groupé sur une même presse. Dans tous les cas de groupage d'outils, on détermine les efforts nécessaires à chacun d'eux ; cela permet d'une part de vérifier que l'effort nominal de la presse est suffisant, et d'autre part de disposer ces outils de façon que le point d'application de l'effort résultant soit le plus près possible de l'axe du coulisseau de la presse

La fabrication des outillages d'emboutissage est généralement assurée sur machines – outils conventionnels tout en prenant en considération le critère économique qui est le coût horaire machine et le coût de la matière, assurant ainsi la facilité des opérations d'usinage. L'outil ne doit pas être une source d'accident pour l'opérateur. Il faut donc lui assurer une alimentation aisée et une extraction facile des pièces, de sorte que le temps de l'action manuelle sous l'outillage soit très court. [7]

### I.8.2. Rayon du poinçon

Le rayon du poinçon  $r_p$  ne doit pas être trop faible pour éviter le décalage du fond de la pièce (amincissement local de la tôle traduisant une déformation locale en expansion) ni trop important pour éviter les risques de plis; en principe il ne doit pas être inférieur au rayon de la matrice. Dans le cas où la pièce exigerait un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation.[7]

### I.8.3. Rayon de matrice $r_m$

D'une manière générale, le rayon de la matrice  $r_m$  est :  $5e \leq r_m \leq 10e$

Une valeur plus précise de  $r_m$  est donnée :

En première passe :  $r_m = k \cdot D - d \dots \dots \dots (I-1)$

Avec  $k = 0.8$  pour un acier doux,

$k = 0.9$  pour l'aluminium.

En deuxième passe :  $r_m = (d_1 - d_2) / 2 \dots \dots \dots (I-2)$

Avec  $d_1$  : diamètre en première passe

$d_2$  : diamètre en deuxième passe [7]

### I.8.4 Jeu entre poinçon et matrice

Le jeu radial entre poinçon et matrice doit être plus grand que l'épaisseur nominale du métal embouti, pour tenir compte des tolérances sur l'épaisseur des métaux en feuilles.

$e < j < e D / d$

Avec  $D/d = B$  tient compte de l'épaississement de la tôle en fin d'emboutissage (déformation en retraite)  $j \leq 1,2 \cdot e$  [Michel. Colomb]

### I.8.5. Serre-flan

D'une manière générale, la surface du serre flan doit être développable. Le serre flan de première passe d'un outil d'emboutissage profond est plan et les pressions à appliquer pour éviter la formation de plis ne peuvent être déterminées avec précision qu'expérimentalement. L'emboutissage des pièces peu profondes (expansion) et des pièces à grandes parois peu déformées entraîne la formation des plis ou une mauvaise conformation (ventre des parois droites). Le serre flan comporte alors des joncs qui empêchent ou diminuent le glissement de la

tôle sous serre flan. Pour contrôler l'écoulement du métal dans la matrice plusieurs jons peuvent être disposés les uns à la suite des autres .Des jons de retenue sont également utilisés lors des opérations de calibrage par étirage des pièces, types cônes, paraboles, etc.[7]

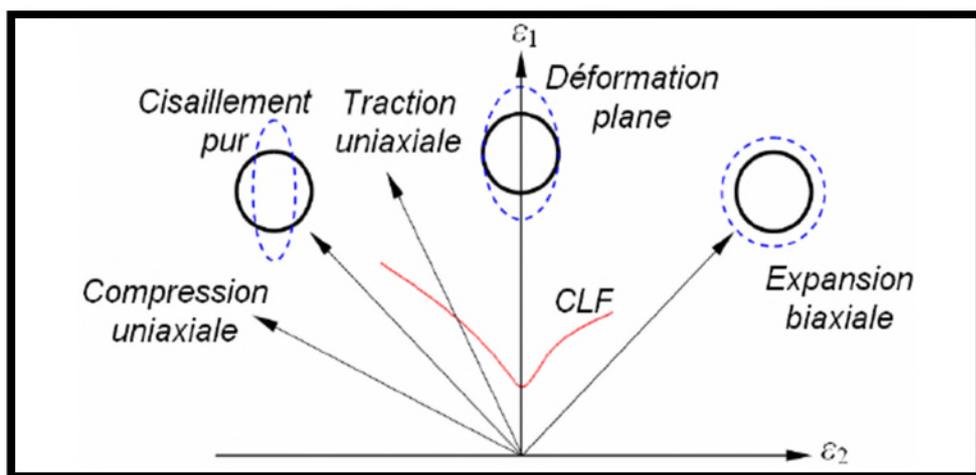
## I.9. Matériaux et formes d'emboutis

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

### I.9.1 Comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage

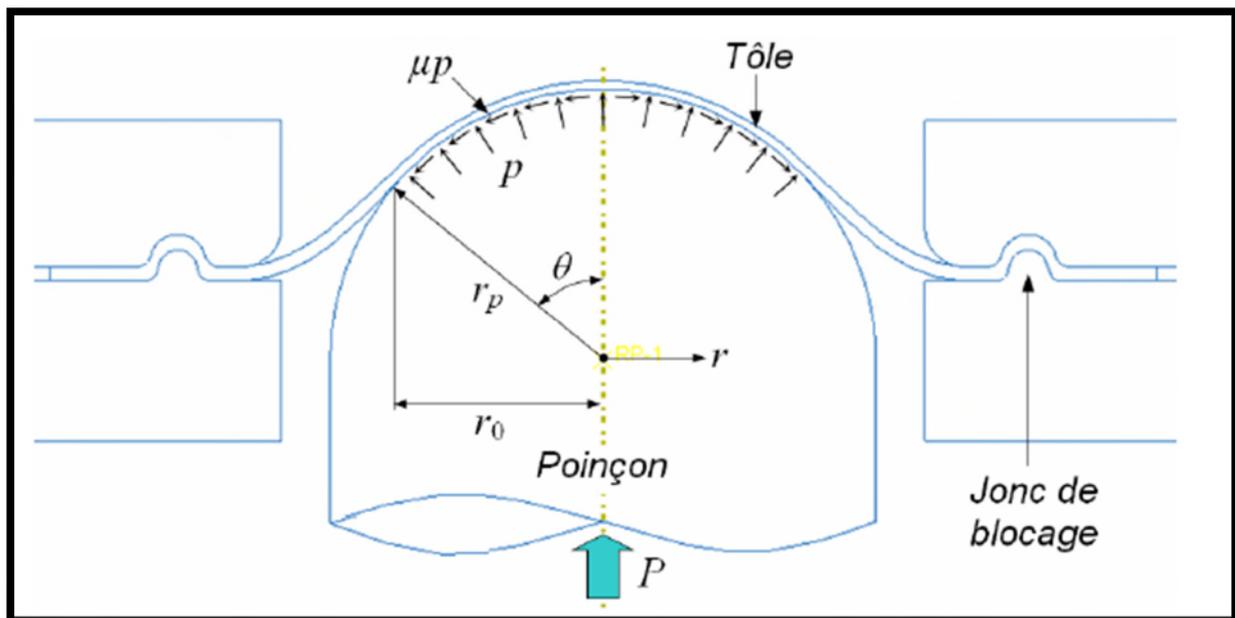
Au cours de l'opération d'emboutissage des tôles minces, différents modes des sollicitations peuvent apparaître dans certaines zones de l'embouti, conduisant à la formation d'ondulations que nous désignerons généralement sous le nom plis ou à des amincissements conduisant à la rupture. Pour un matériau donné, ces capacités de déformation peuvent différer fortement d'un mode à l'autre et c'est la raison pour laquelle nous aborderons l'étude de la formabilité des tôles par la définition de ces différents modes (FigureI.17)

- Expansion biaxiale ;
- Traction uniaxiale ;
- Cisaillement pur ;
- Rétreint ;
- Compression uniaxiale.



**FigureI.17.** Modes de déformation dans le repère des déformations principales majeure et mineure.[2]

La Figure 18 met en évidence un emboutissage par expansion pure type Erichsen. La tôle est soumise à l'action d'un poinçon hémisphérique alors que le métal du flan est bloqué sous le serre-flan : la surface du flan a donc augmenté au détriment de son épaisseur. Les conditions de lubrification ont peu d'influence sur l'évolution de l'aire de contact et sur la force d'emboutissage, mais beaucoup sur la déformation plastique. A faible frottement, l'amincissement est maximal au pôle de l'embouti où se produit la rupture. Plus le frottement augmente, plus l'amincissement s'éloigne du pôle.



**Figure I.18.** Emboutissage en expansion pure type Erichsen.

Deux grandes familles de matériaux largement utilisés en industrie

### I.9.1.1. Les aciers

Les techniques modernes de laminage permettent d'obtenir des tôles d'acier très minces, avec une surface propre et lisse, une structure homogène et une gamme de caractéristiques mécaniques adaptées aux exigences de l'emboutissage. Ces tôles sont classées en trois catégories : tôle de fabrication courante (TC), tôle d'emboutissage (E), et tôle d'emboutissage spéciale (ES) (Tableau 1).

**Tableau I.1.** Caractéristiques des différentes catégories des tôles. [5]

	Résistance à la rupture ( $daN/mm^2$ )	Allongement (%)	Dureté Rockwell
TC	42	24	65
E	38	30	57
ES	35	36	50

Les aciers inoxydables comportent différemment de l'acier doux en raison de la présence de nickel et de chrome. Ainsi les vitesses d'emboutissage doivent être plus lentes que pour l'acier, le métal s'écroutissant plus rapidement.

### I.9.1.2. Les alliages non ferreux

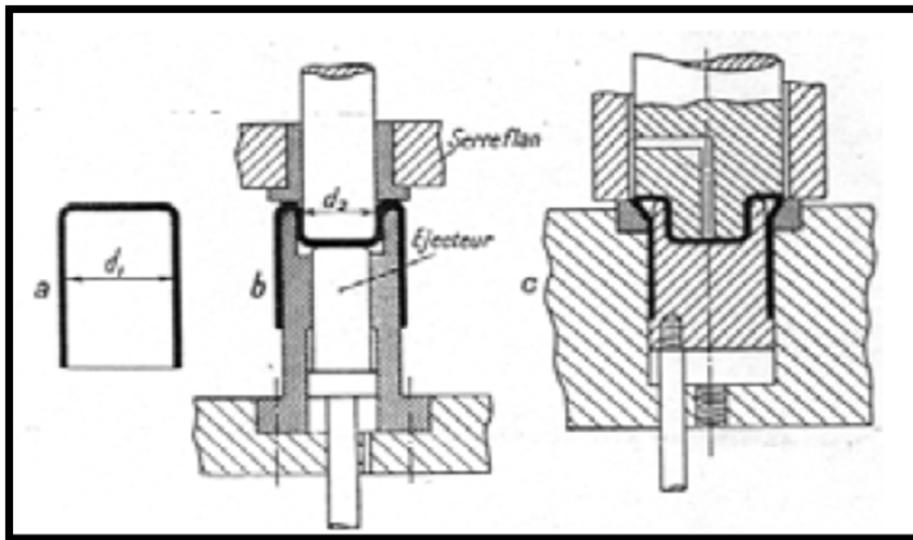
- Les laitons : Les plus couramment utilisés sont ceux désignés sous le nom de 60/40 (avec addition de plomb pour les utilisations en horlogerie et sans addition pour les pièces optiques, de sidérurgie) et de 72/28 (pour l'emboutissage extra profond. Cette qualité (72% cuivre, 28% de zinc) est employée pour la fabrication de cartouches et de douilles évitant des opérations de recuit).
- L'aluminium et ses alliages : ces alliages s'écroutissant à l'emboutissage, l'étrépage le plus profond ne s'obtient qu'avec les qualités les plus douces. On peut toutefois obtenir des emboutis peu profonds avec des qualités plus dures.
- Le cuivre : non allié à un autre élément, le cuivre rouge possède d'excellentes qualités d'emboutissage extra profond, souvent supérieures à celles du laiton ou de l'acier spécial.
- Le zinc : il s'emboutit facilement mais, dans le cas d'emboutissage de forme complexe, il est nécessaire de le chauffer entre 100° et 150°C.
- Le nickel et ses alliages : ils possèdent d'excellentes qualités d'emboutissage. Les plus couramment utilisées sont ceux contenant 60 à 65% de cuivre, 20 % de zinc, et 15 à 20 % de nickel.
- Le magnésium : c'est le plus léger des métaux utilisés dans l'industrie. A température ambiante le magnésium ne peut être embouti que dans certaines limites. Pour réaliser des pièces semblables à celles obtenues avec l'acier, il est indispensable de chauffer de 200° à 500°C en fonction de la qualité d'emboutis souhaités.
- Le titane : ce métal se comporte comme le magnésium : les flans doivent être chauffés entre 200° et 350°C, selon s'il s'agit de titane pure ou d'un alliage. La

matrice et le poinçon sont également chauffés pour éviter le choc thermique auquel le métal est sensible.

### I.9.2. Formes des pièces emboutis

D'une façon générale, les pièces embouties sont de forme simple telle que cylindrique, conique, sphérique ou prismatique. Cependant, ces formes simples sont déjà relativement difficiles à réaliser et ne sont généralement réalisables qu'avec un emboutissage par étapes, c'est à dire un emboutissage où la forme désirée n'est obtenue qu'après un certain nombre de phases successives.

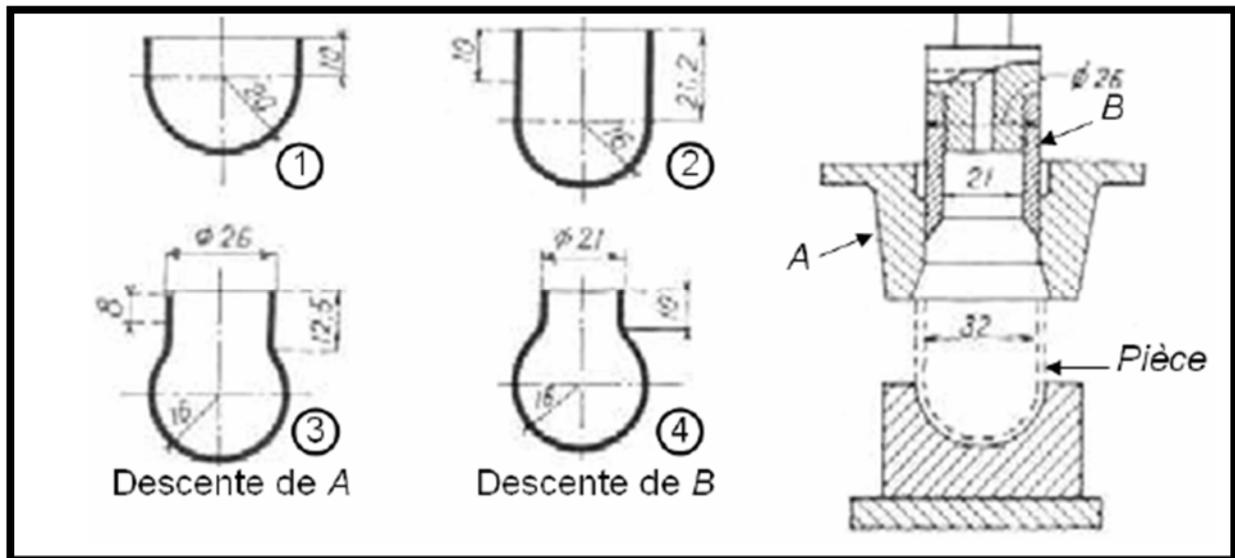
**I.9.2.1. Forme cylindrique:** La forme cylindrique est facilement réalisable avec de bonnes conditions opératoires. A partir de cette forme simple il est possible de réaliser des formes plus évoluées avec la méthode d'emboutissage dit renversé.



**Figure I.19.** Emboutissage renversé [5]

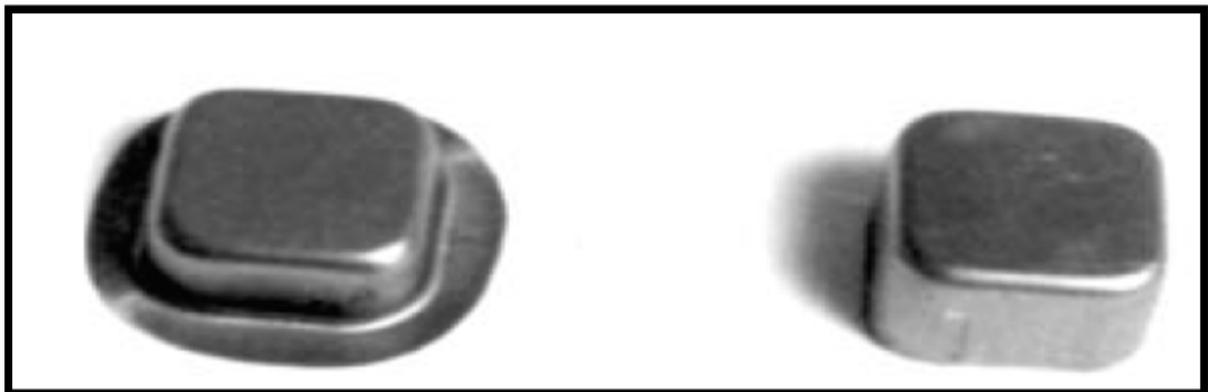
**I.9.2.2. Forme conique:** La forme conique ne peut être obtenue qu'après au moins 4 passes. Cette technique permet d'obtenir des formes qu'il aurait été impossible à former en une seule passe.

**I.9.2.3. Forme demi-sphérique:** L'emboutissage d'une demi-sphère est difficile en raison de la formation de plis, mais il est possible en une seule passe si la matrice est munie d'un bourrelet.



**Figure I.20.** Emboutissage de pièce demi sphérique[5].

**I.9.2.4. Forme rectangulaire:** Dans les emboutis rectangulaires on peut considérer que seuls les rayons latéraux sont emboutis (quart d'embouti cylindrique), les flancs étant simplement Cambrés.



**Figure I.21.** Emboutis rectangulaires [5].

## I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir défini le procédé d'emboutissage et montré l'importance de ce procédé parmi les autres procédés de mise en forme, nous avons mis en clair tout ce qui concerne le procédé d'emboutissage. En premier lieu, une description des modes du procédé, des matériaux emboutissables, du comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage et des différentes formes des pièces embouties, a été faite. Ensuite, nous

avons montré les différentes caractéristiques du procédé telles que : les modes de déformation lors de l'opération du procédé et leur mesure.

**Chapitre II**

**Étude des paramètres  
d'emboutissage**

## II.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons une description de l'aspect opératoire d'où il s'agit des paramètres liés à la presse et liés à la tôle. Comme nous parlerons aussi sur les défauts d'emboutissage qui se résument au retour élastique, striction, et plissement.

## II.2.Caractérisation en emboutissage

Dans les buts de réussir au plus vite un nouvel embouti, de réduire le temps entre deux séries et donc de caractériser l'emboutissage, le recours à des machines de traction est souvent nécessaire. Cette machine permet de reproduire de petits emboutis sans demander un outillage perfectionné.

Afin de permettre cette caractérisation, deux approches sont possibles mais surtout complémentaires.

D'une part, un aspect que l'on peut qualifié de métallurgique et qui correspond aux relations entre les propriétés du métal et ses performances. D'autre part, un aspect opératoire ayant pour objectif de préciser l'influence des différents paramètres de la presse sur la réussite de la pièce. Néanmoins, il est important de préciser que l'étude de ces deux aspects nécessite une analyse préalable des déformations subies par le flan. Ce type de mesures s'effectue à l'aide d'une grille gravée sur la face externe de la future pièce. [8]

## II.3.Aspects métallurgiques d'emboutissage

L'étude de l'emboutissage suivant l'aspect métallurgique tend à mettre en évidence une relation générale entre l'influence des caractéristiques du métal et les performances obtenues sur presse. On parle dans ce cas des critères d'emboutissabilité, de la taille des grains, de la structure cristallographique ainsi que des éléments constitutifs du métal. [8]

## II.4. Aspects opératoires

Lors de l'emboutissage d'une pièce, que ce soit en laboratoire ou en industrie, plusieurs paramètres permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité. Ces réglages doivent tenir compte de la nature de la tôle, ainsi que de la forme souhaitée.

Une presse, ou une machine de traction ayant pour objectif la réalisation d'emboutis, sont composées d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre flan (Figure 2). Cet outillage offre déjà plusieurs possibilités de réglages :

- ✓ La pression du poinçon ;
- ✓ La vitesse du poinçon ;
- ✓ La pression de serrage des serres flan ;

✓ Le jeu entre le poinçon et la matrice...

A ces paramètres, il faut ajouter la lubrification, la taille optimale de la tôle ainsi que son épaisseur. Les nombreuses interactions existant entre ces paramètres font que pendant longtemps, l'emboutissage est resté un art.

Ces réglages doivent être précis car ce sont eux qui déterminent la qualité du produit final, mais doivent également tenir compte du besoin de rentabilité de l'entreprise. En effet, si la vitesse de poinçon est trop faible, la durée de mise en forme d'une pièce dépasserait son niveau de rentabilité. [9]

#### II.4.1. Paramètres liés à la presse

##### II.4.1.1. Le jeu entre le poinçon et la matrice

Lorsque l'espace entre le poinçon et la matrice est théoriquement égal à l'épaisseur de la tôle, il se produit une augmentation de l'épaisseur de la paroi.

L'augmentation de ce jeu a une influence favorable sous l'effet du poinçon mais entraîne certains inconvénients tels que :

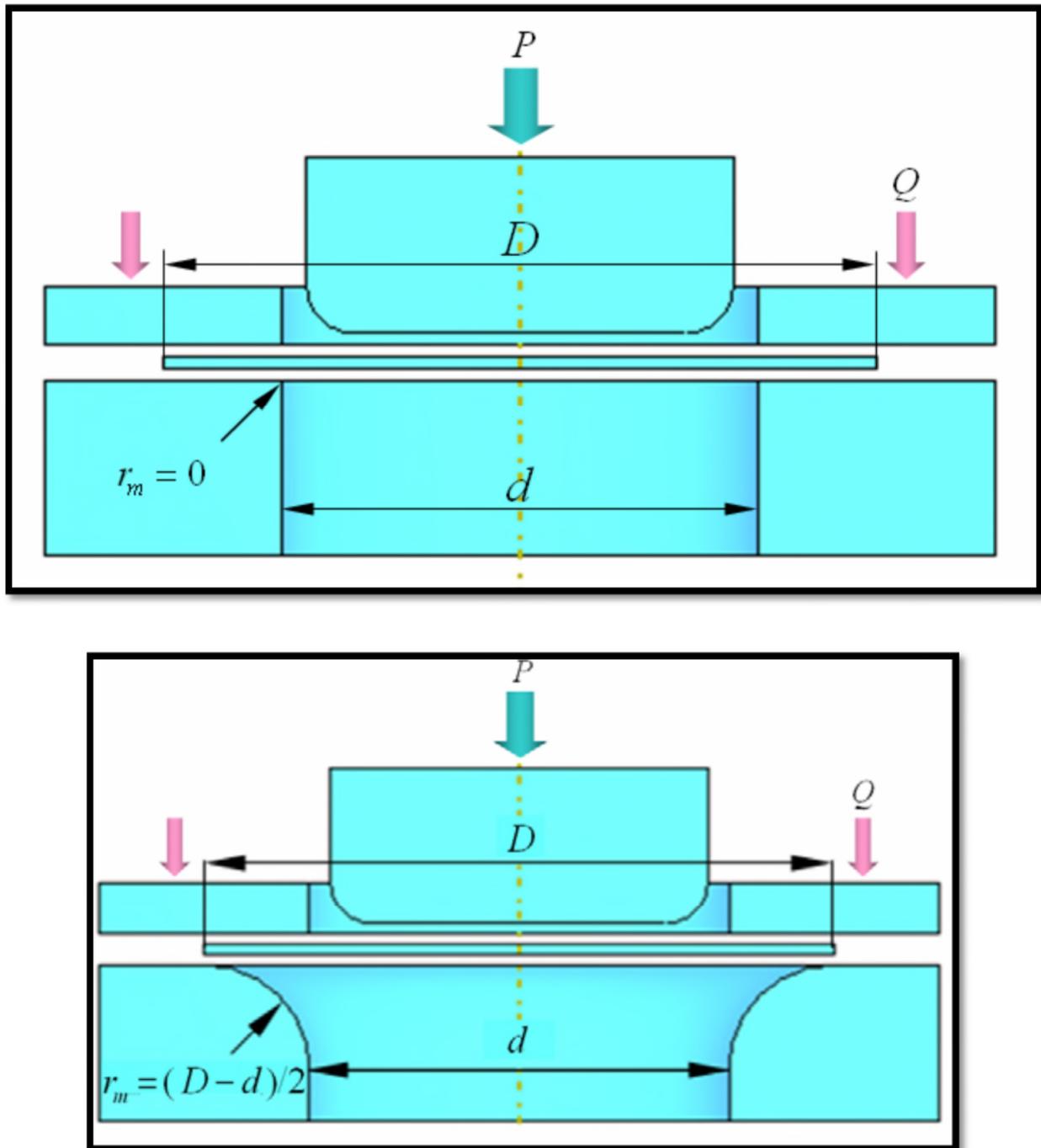
- La détérioration du profil de la paroi.
- Déviation du poinçon entraînant la formation de languettes sur le bord de l'embouti.
- Apparition de plis sur la paroi de l'embouti.

Inversement, si l'épaisseur du flan est plus grande que l'espace existant entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi. Il est courant d'utiliser des tables donnant le jeu en fonction de l'épaisseur du flan  $h$ . Elles sont basées sur les formules suivantes

- Pour l'acier :  $Jeu = h + 0.07 (10h)^{1/2}$
- Pour l'aluminium :  $Jeu = h + 0.02 (10h)^{1/2}$
- Pour métaux non ferreux :  $Jeu = h + 0.04 (10h)^{1/2}$

##### II.4.1.2. Le rayon sur la matrice

Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la répartition des forces. En effet, on comprend parfaitement que dans les deux cas extrêmes, l'emboutissage n'est pas viable. On observera pour  $rm = 0$  un déchirement du flan et pour  $rm = (D - d)/2$  la formation de plis.



**Figure.II.1.** Variation de l'arrondi sur la matrice. [9]

Afin de déterminer le rayon efficace, on utilise la relation de *Kaczmarek* donnant :

- Pour l'acier :

$$r_m = 0.8 [(D - d)h]^{1/2}$$

- Pour l'aluminium :

$$r_m = 0.9 [(D - d) h]^{1/2}$$

D diamètre du flan (mm), d diamètre de l'embouti (mm) et h épaisseur du flan (mm).

#### II.4.1.3. Arrondi sur le poinçon

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec la surface inférieure du poinçon subit l'action des forces de frottements qui empêchent la matière de bouger. L'effort du poinçon se transmet aux parois de l'embouti. Le poinçon doit contenir un arrondi pour ne pas percer le flan. Généralement, on prend le rayon du poinçon inférieur à celui de la matrice.

#### II.4.1.4. La vitesse d'emboutissage

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Les transformations que subit le métal à froid entraînent un écrouissage de celui-ci dépendant de cette vitesse. Une vitesse trop faible, tend donc à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'au niveau du flan. Cette altération pouvant alors se traduire par une rupture du flan. D'après *BLISS1*, il existe une vitesse optimale pour chaque métal :

- Pour l'acier : 200 mm/s
- Pour les aciers doux : 280 mm/s
- Pour l'aluminium : 500 mm/s

#### II.4.1.5. La pression du serre-flan

La suppression des plis est un des objectifs majeurs de l'emboutissage.

Le rôle du serre-flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebord du flan en exerçant une pression appropriée. La présence du serre-flan ne s'impose que si  $d < 0.95D$  ou  $h < 0.2 (D - d)$ .

Dans la pratique, il faut que le serre-flan soit bien trempé et rectifié. La pression est réglée à l'aide de clés dynamométriques, de ressorts ou de caoutchouc, en fonction de l'aspect de l'embouti :

- Si la paroi est sans plis et d'aspect brillant, la pression est adaptée.
- Si la paroi est bonne mais que les bords supportent des marques de dentures, c'est que la pression est trop faible.

- S'il se produit un déchirement lors de la descente du poinçon, c'est que la pression est trop importante.

Ainsi, pour un embouti cylindrique de diamètre  $d$  et de flan de diamètre  $D$ , l'effort de serrage appliqué sur le serre-flan sera :

$$Q = (\pi/4) [D^2 - (d + 2r_m)^2] p$$

Où  $p$  pression spécifique

- Pour les aciers doux :  $p = 25 \text{ daN/cm}^2$
- Pour les aciers inox :  $p = 20 \text{ daN/cm}^2$
- Pour l'aluminium :  $p = 10 \text{ daN/cm}^2$

Il est également possible de faire appel à une installation pneumatique ou hydraulique offrant un réglage de la pression plus facile qu'avec un dispositif à ressort ou en caoutchouc.

#### II.4.1.6.L'effort d'emboutissage

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend tout d'abord des diamètres de l'embouti et du flan primitif, de l'épaisseur et de la qualité de la tôle. Il dépend également de la pression de serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de l'arrondi de la matrice, du jeu entre poinçon et matrice et de la lubrification. Il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs dans la détermination de l'effort du poinçon, c'est pourquoi il est commun d'employer la formule simplifiée suivante :

$$P = \pi d h k R_m$$

Avec  $k$  coefficient en fonction de  $d/D$ ,  $h$  épaisseur du flan,  $R_m$  résistance à la rupture en traction. [9]

#### II.4.2. Paramètres liés à la tôle

##### II.4.2.1.La taille du flan

Il est important de déterminer la taille du flan primitif pour d'une part économiser la matière et d'autre part faciliter l'emboutissage. La détermination des dimensions du flan a pour base l'égalité des volumes de l'embouti et du flan primitif.

- **Flan pratique** : Il ne se peut déterminer qu'à la suite d'essais sur des outils d'emboutissage réalisés.

L'outil de découpage du flan n'est exécuté qu'après ces essais.

- **Flan théorique** : D'après le dessin de l'embouti désiré et en ajoutant de 2 à 3 mm autour du flan pour détournage (Figure 2), on détermine le diamètre du flan donné par

$$D^2 = 4S/\pi$$

Où  $S$  est la surface de l'embouti, calculée par le théorème de Guldin

La surface engendrée par une ligne plane tournante autour d'un axe situé dans son plan et ne le traversant pas est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité.

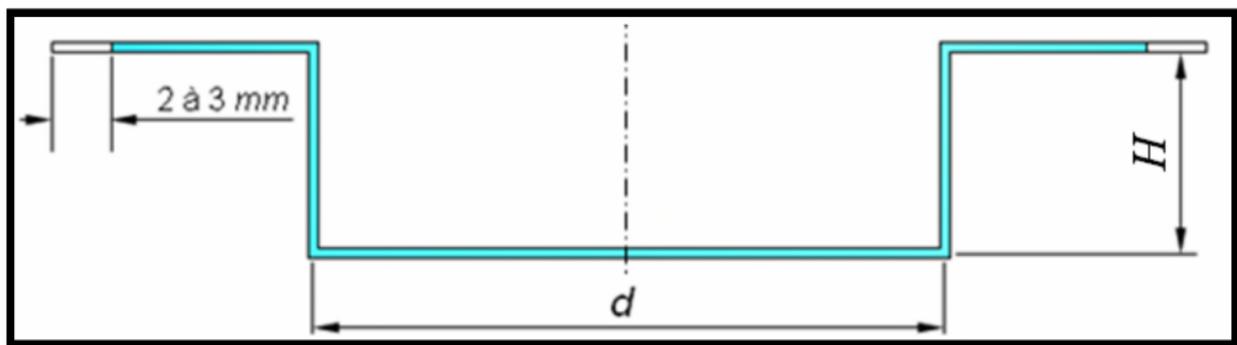


Figure.II.2. Ajout de 2 à 3 mm pour détournage [9]

#### II.4.2.2. La lubrification

Parmi les techniques permettant de maîtriser le frottement, l'adhésion et l'usure entre deux corps, la lubrification est certainement la plus courante et la plus anciennement pratiquée. Elle consiste à intercaler entre les deux corps, un troisième corps de faible scission et de contrainte de rupture faible. Ainsi, une lubrification adaptée facilite l'écoulement de la tôle entre la matrice, le serre-flan et le poinçon. Cependant, la lubrification de la partie centrale du flan a un effet néfaste. On peut expliquer ce phénomène par le fait que lubrifier diminue l'adhérence entre le poinçon et les parois de l'embouti. L'effort est alors concentré sur le fond de l'embouti à proximité duquel il y a rupture. C'est pour cette raison qu'il n'est utile de lubrifier que la face du flan opposée au poinçon. Dans le cas d'un poinçon de petit rayon, il est préférable de ne pas lubrifier voir même d'augmenter la rugosité du poinçon afin d'éviter une forte déformation par expansion localisée. [9]

## II.5. Tolérances dimensionnelles

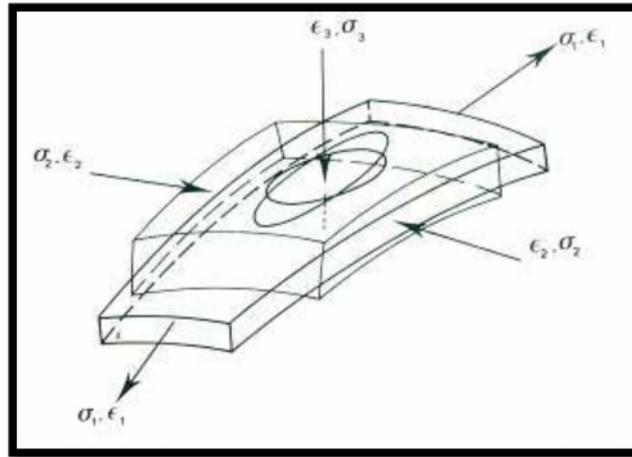
La pièce emboutie n'a jamais la géométrie de l'outil. Certes, elle s'en rapproche souvent de très près, mais présente généralement un écart de cote lié au retour élastique de la pièce après extraction de l'outil. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la limite d'élasticité du métal est plus élevée et son module d'élasticité plus faible. Il se produit généralement par une augmentation des rayons de courbure, une ouverture des angles et un raccourcissement des fibres.

Cet écart par rapport à la géométrie nominale peut être minimisé par une mise au point méticuleuse des outils. Mais il ne peut généralement être complètement annihilé du fait des dispersions inévitables de l'ensemble des paramètres qui régissent le procédé. Si cette différence de géométrie n'est pas contenue dans des tolérances sévères, elle peut être préjudiciable au bon fonctionnement du processus aval fortement automatisé. A titre d'exemple, les écarts angulaires tolérés sont généralement inférieurs au demi – degré .une opération de calibrage peut parfois s'avérer nécessaire pour les aciers à très bas carbone et sans interstitiels sont particulièrement bien adaptés au formage des pièces difficiles du fait de leur faible limite d'élasticité (110 à150 MPa), de leur forte anisotropie ( $R > 2$ ), de leur forte écrouissabilité et de leur allongement important. [10]

## II.6. Etude des contraintes et déformation dans l'emboutissage

L'étude du procédé d'emboutissage passe par l'analyse des déformations plastiques et des états de contraintes rencontrés en emboutissage.

Au cours de l'opération de la mise en forme chaque portion du flan subit des déformations imposées par la forme des outils. Ces déformations correspondent à un état de contrainte spécifique. L'état mécanique de chaque élément est défini par les déformations principales ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ) et par les contraintes principales ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) figure II.3.



**Figure II.3.** Etats de contrainte et de déformation d'un élément fini de tôle mince. [11]

Tous les modes de déformations en emboutissage et les états de contraintes sont représentés respectivement et également résumés dans le Tableau II .2.

L'expansion bi axiale correspond à ce qu'il se passe au nez du poinçon. Cette expansion est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous le serre-flan. La traction correspond généralement à ce qu'il se passe dans les parois verticales de l'embouti. La traction plane correspond à ce qu'il se passe sur un embouti à la transition entre la déformation sur le nez du poinçon et celle dans la paroi verticale de la pièce.

La traction uniaxiale est la trajectoire limite entre les zones sollicitées en traction large et celles sollicitées en rétreint. Le cisaillement est un trajet de formage où toute déformation en traction est compensée par une déformation en compression sans que l'épaisseur diminue ou augmente. Ce type de trajet peut se trouver dans la zone sous le serre flan lorsque l'écoulement est homogène (embouti axisymétrique). Le domaine de rétreint se situe au-delà de la droite de cisaillement. Cette déformation correspond généralement aux zones sous le serre-flan quand la tôle s'épaissit. [11]

Tableau II.1. Modes de déformation d'emboutissage. [11]

Mode	Déformations	Contraintes
Expansion biaxiale	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 > 0 \quad \varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$
Expansion symétrique	$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 / 2 \\ \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq -\varepsilon_3 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 = \sigma_2$ $\sigma_1 \neq \sigma_2$
Déformation plane	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 = 0 \quad \varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_2 = \sigma_1 / 2$
Traction uniaxiale	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_2 + \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \begin{cases} \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 / 2 & - \text{Isotropie} \\ \varepsilon_2 = r\varepsilon_3 = -r\varepsilon_1 / (1+r) & - \text{Anisotropie} \end{cases}$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = 0$
Cisaillement pur	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 = 0$ $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_1 = -\sigma_2$
Rétreint	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 > 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$
Compression uniaxiale	$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \begin{cases} \varepsilon_1 \neq \varepsilon_3 \neq -\varepsilon_2 / 2 \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 > \sigma_3$ $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$

## II.7. Influence de la structure des tôles minces sur leurs emboutissabilité

Les tôles minces ont pour principales caractéristiques d'être des agrégats polycristallins.

Les propriétés mécaniques et donc l'emboutissabilité des tôles dépendent pour une grande part des caractéristiques de ces agrégats (taille des grains, texture cristallographique), elles dépendent aussi des particules de seconde phase et des teneurs des éléments en solution. [12]

### II.7.1. Influence de la taille des grains

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

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

Où  $d$  est le diamètre moyen des grains,  $\sigma_0$  est la limite d'élasticité du monocristal et  $K$  un coefficient dépendant du matériau et de la température. L'augmentation de la taille des grains améliore l'emboutissabilité des tôles minces, mais il faut cependant savoir que cette

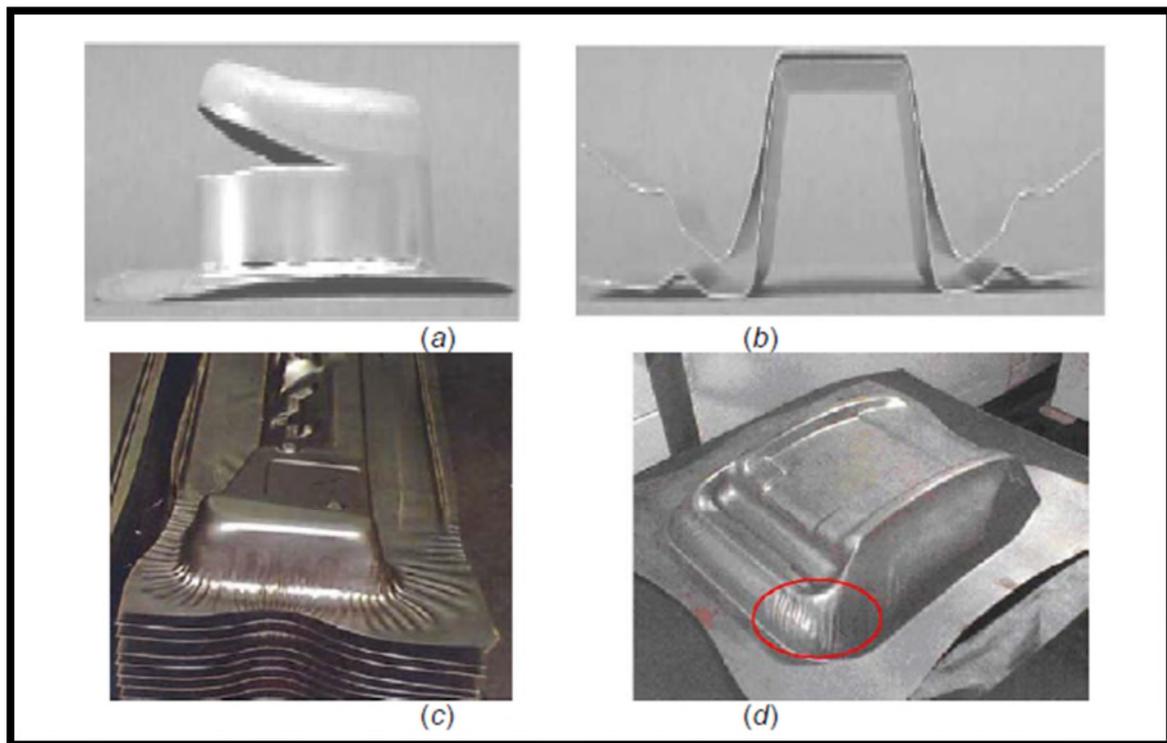
augmentation de la taille des grains n'est pas limitée. Des grains trop gros entraînent l'apparition de nombreux défauts de surface lors de l'emboutissage tels que peau d'orange. [12]

### II.7.2. Influence du coefficient d'écroutissage

Le coefficient d'écroutissage  $n$  donne une représentation de capacité de consolidation du métal en traction. Cette consolidation joue un double rôle : elle augmente le niveau de déformation que peut supporter le métal d'une part et elle permet surtout une meilleure répartition des déformations d'autre part. [12]

### II.8. Principaux défauts rencontrés en emboutissage

Au cours de l'opération de mise en forme par emboutissage la feuille métallique subit différents modes de sollicitations. Dans certaines conditions, ces modes conduisent à la formation d'ondulations que nous désignerons généralement sous le nom plis ou à un amincissement excessif conduisant à la rupture de la tôle (Figure.II.4).



**FigureII.4.** Rupture (a), retour élastique (b) et plissement (c) et (d). [17]

La rupture et le plissement ne sont pas les seuls critères d'acceptation ou de refus d'une pièce. En effet, selon la fonction recherchée de l'embouti final, les défauts géométriques doivent être pris en compte le plus précocement possible dans la conception des pièces. Il s'agit d'apporter des modifications sur sa géométrie et/ou adapter l'outil ou les

paramètres du procédé, pour compenser les écarts géométriques et réduire le retour élastique. La difficulté principale de l'emboutissage de pièces complexes est de contrôler le procédé à l'intérieur de ces limites de défaillances. Nous souhaitons que la pièce après mise en forme ne présente pas de défauts volumiques, surfaciques et dimensionnels

- les défauts de la surface tels que la présence de rayures, signes de grippage, etc.
- la rupture ;
- la non-conformité de la forme de la pièce qui est due à un retour élastique excessif ou à une formation de plis dans certaines zones de la pièce emboutie ;
- la détérioration du revêtement.

L'aspect de la surface constitue un critère déterminant pour l'acceptation des pièces de robe de la carrosserie et peut également être pris en compte pour certaines pièces de structure partiellement visibles

La rupture, se traduit par une faiblesse du point de vue mécanique et du point de vue aspect. Physiquement, elle se manifeste par une localisation de la déformation. La rupture se produit généralement dans les zones où l'embouti est sollicité en expansion ou en traction plane. Elle apparaît quand les déformations locales ont dépassé la capacité d'allongement plastique du métal. De nombreuses méthodes sont utilisées, pour prédire ce type de défaut [13]

Après extraction de la pièce, on observe souvent des défauts de tolérances dimensionnelles. En effet, la pièce emboutie n'a jamais la géométrie de l'outil. Elle s'en rapproche de très près, mais elle présente en général un écart de cote lié au retour élastique après retrait des outils. Le retour élastique est d'autant plus marqué que la limite d'élasticité du métal est plus élevée (Acier) et son module d'élasticité plus faible (Aluminium). Cet écart à la géométrie nominale peut être minimisé par une mise au point précise des outils. Si cette différence de géométrie n'est pas contenue dans des tolérances sévères, elle peut être préjudiciable au bon fonctionnement de la pièce. Une opération de calibrage peut parfois s'avérer nécessaire pour assurer la précision géométrique recherchée.

Le plissement est un phénomène d'instabilité de type flambement dû à l'existence de contraintes de compression locales dans la tôle. L'analyse du plissement est un problème complexe dans sa globalité. Les plis sont généralement associés à des déformations en rétreint, ils peuvent apparaître aussi bien dans les brins libres (facettes courbes) que sous serre-flan (facettes planes). Ils résultent aussi bien des contraintes de formage proprement

dites que des contraintes résiduelles libérées après décharge et extraction de la pièce hors des outils.

La meilleure réponse à ce type de phénomène consiste à éviter de telles zones de compression lors de l'opération de mise en forme. Mais cela n'est bien sûr pas toujours possible. Sur le plan matériau, les éléments à prendre en compte sont

- **L'épaisseur** : Plus elle est faible, plus l'inertie décroît, plus le plissement est probable.
- **La limite d'élasticité** : Sous l'action d'une compression dans son plan, l'idéal serait qu'une tôle s'épaississe en se déformant plastiquement. Mais plus la limite d'élasticité est élevée, plus est retardé le début de cette déformation plastique, plus haute est la contrainte atteinte et plus brusque sera le flambement de la tôle. Les tôles ayant les plus basses limites d'élasticité sont donc celles qui plisseront le moins.
- **Le coefficient d'anisotropie normale  $r$**  : S'il a une haute valeur cela signifie que le métal se rétreint facilement, donc sous des contraintes faibles. De ce fait, les contraintes de compression radiale sont limitées et le plissement sera retardé. [14]

Du côté du procédé, il n'y a que deux possibilités d'amélioration :

- Interdire la naissance des plis et réduire les contraintes de compression circonférentielles, en retenant plus la tôle sous serre-flan dans les zones en rétreint par le contrôle de la force de serrage et/ou par l'utilisation des joncs ;
- Limiter autant que possible les brins libres dans les zones centrales des pièces en utilisant des systèmes appliquant une pression sur la face intérieure (hydroformage ou élastoformage).

Parallèlement, plusieurs facteurs, tous de la même importance, contribuent à la bonne réussite d'une opération de mise en forme par emboutissage. Ceci rend donc difficile tout contrôle parfait.

Ces facteurs sont :

- les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé ;
- la géométrie du flan et des outils (rayons de raccordement, jeu matrice poinçon.
- l'état physique de surface de la tôle et celles des outils (en particulier la rugosité des surfaces). La rugosité est déterminante pour l'interaction avec le lubrifiant et pour les caractéristiques d'un revêtement éventuellement présent ;
- la géométrie et/ou l'emplacement des joncs. [15]

## II.9. Principaux paramètres du procédé d'emboutissage

Le comportement du flan au cours du procédé d'emboutissage est complexe et dépend de nombreux paramètres tels que :

- les propriétés mécaniques du matériau à mettre en forme ;
- la géométrie du flan ;
- les propriétés tribologiques de l'interface outil-flan ;
- les efforts de serrage et d'emboutissage ;
- la géométrie des outils ;
- la vitesse des outils ;
- la température de mise en forme ;

Pour réduire le nombre des pièces défectueuses et pour faciliter la mise au point des outils, il s'avère nécessaire d'arriver à une meilleure compréhension de l'influence de différents paramètres du procédé sur la qualité de la pièce. Ainsi, la maîtrise et l'optimisation de certains paramètres opératoires du procédé permettent d'améliorer la formabilité du matériau et la robustesse du procédé. En effet, la réussite de l'opération d'emboutissage repose généralement sur un minutieux travail de mise au point.

L'utilisation de la simulation numérique couplée avec des algorithmes d'optimisation permet une mise au point automatique et virtuelle. Parmi les paramètres les plus pertinents à contrôler, on peut citer

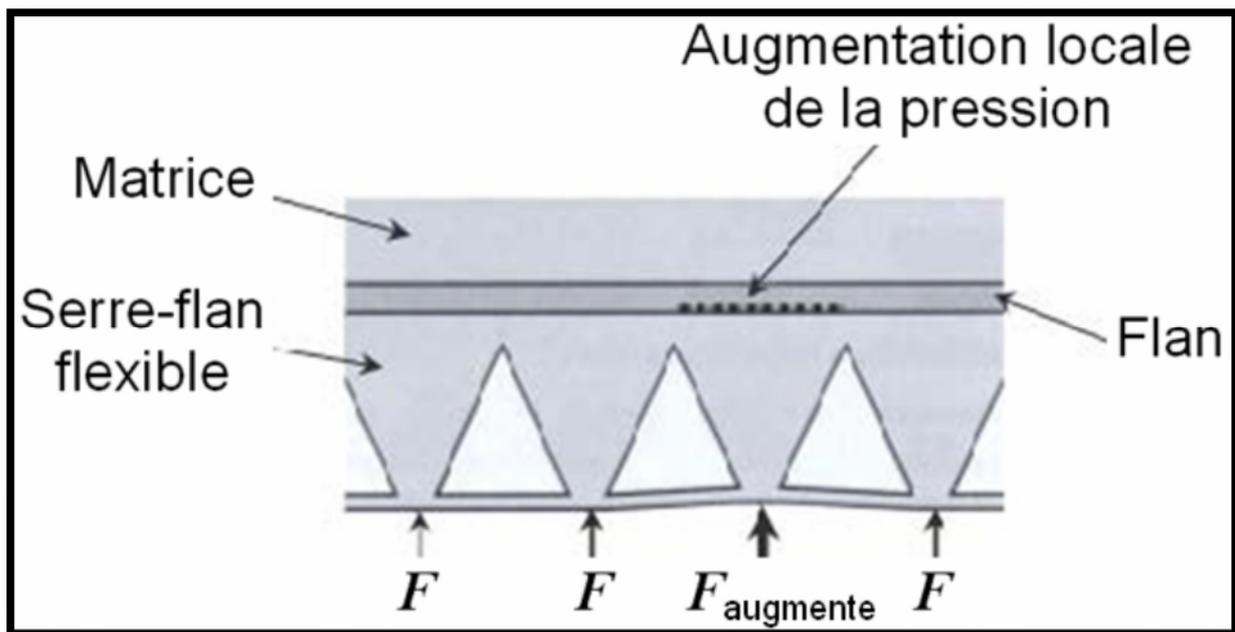
### II.9.1. Forme du flan initial

Plusieurs concepteurs ont proposé d'optimiser la géométrie du flan initial. Les variables de conception sont alors les points de contrôle d'une B-spline cubique uniforme. Différentes fonctions Objectifs sont testées. Elles utilisent les variations d'épaisseur pour contrôler les risques de trop fort amincissement, qui précède la rupture de la tôle et les risques d'épaississement, qui traduit une tendance à la formation de plis. [16]

### II.9.2. Effort de serrage

Les développements actuels et les futures recherches de la technologie d'emboutissage ont comme objectif principal l'amélioration de la fiabilité du procédé. En conséquence, beaucoup d'efforts ont été faits pour mieux adapter les presses mécaniques aux besoins des formages compliqués surtout pour les opérations d'emboutissage profond les plus

déliçates. Le développement le plus significatif est la segmentation élastique du serre-flan (Figure.II.5). Ce type de serre-flan a été utilisé dernièrement dans de nombreux travaux de recherche. Sous l'effet des efforts exercés par des vérins hydrauliques et grâce à son comportement élastique, une augmentation de la pression dans un vérin engendrera une augmentation locale de l'effort de serrage, qui ralentit localement l'écoulement de la matière. [17]



**Figure.II.5.** Principe de la segmentation élastique du serre-flan. [17]

La détermination de la force de serrage (ou pression de serrage) optimale pour des emboutis de formes simples ou complexes a fait l'objet de nombreux travaux. Descamps, Chamont et Kergen ont étudié et analysé la formabilité des deux matériaux en utilisant un serre-flan conventionnel et un serre-flan flexible. Ils ont combiné différents profils de serrage pour le serre-flan flexible :

- Force constante (pression uniforme et constante) ;
- Profil global de la force de serrage ;
- Profil local de la force de serrage (par zone).

A travers cette étude ils ont montré qu'avec un serre-flan flexible et en ajustant localement la force de serrage on peut atteindre des profondeurs de plus en plus élevées même pour des matériaux très résistants. [17]

### II.9.3. Force de retenue de jonc

Un jonc est une chicane située dans la partie sous serre-flan sur la trajectoire de la tôle et qui va plus ou moins empêcher le mouvement de la tôle suivant sa géométrie (Figure.II.6.)

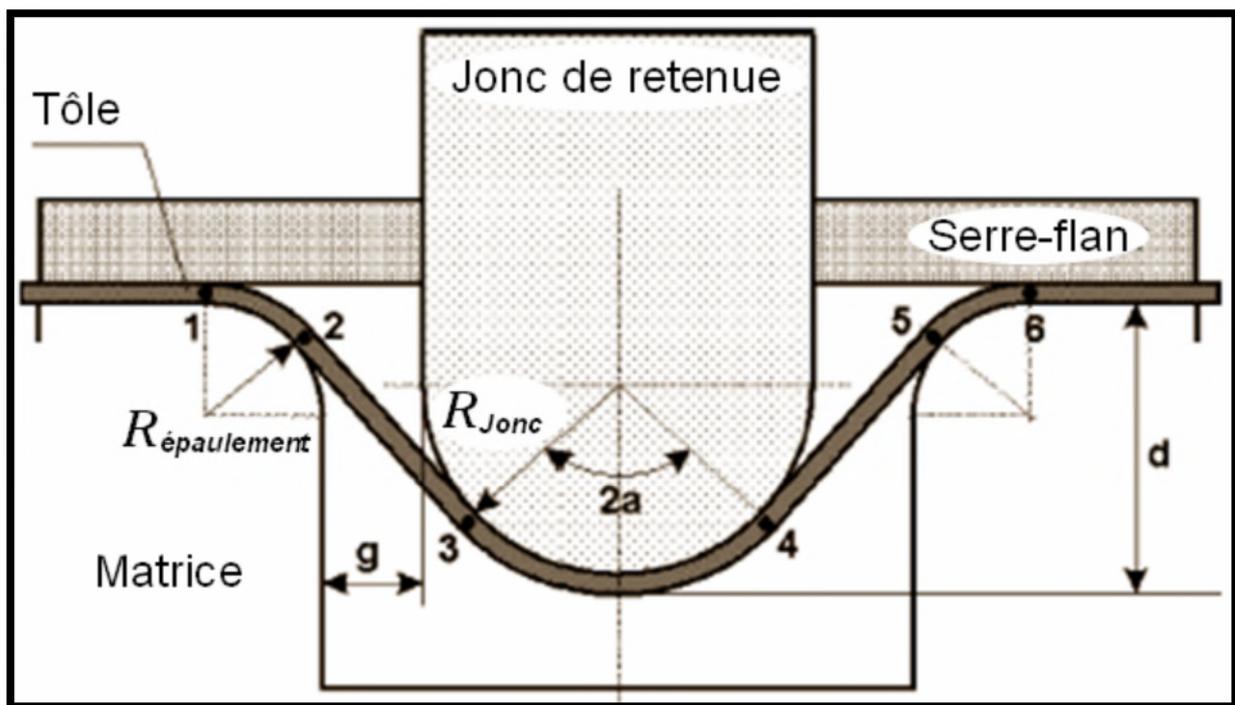


Figure.II.6. Géométrie d'un jonc de serrage. [17]

La géométrie du jonc n'est pas du même ordre de grandeur que les dimensions de la pièce à emboutir.

Une simulation numérique qui intègre le contact-frottement entre la tôle et le jonc sera coûteuse en temps de calcul. Notamment, il faudra utiliser localement un maillage fin dans la zone du jonc, alors que la partie sous serre-flan n'est généralement pas dans la partie utile de la pièce emboutie et disparaît dans les opérations post-emboutissage (découpe...) [17]

## II.10. loi de comportement

### II.10.1. Ecrouissage

La déformation plastique conduit à une évolution de la surface de charge. Nous nous limitons ici à l'écrouissage supposé isotrope, c'est-à-dire que la surface de charge se dilate uniquement. Dans ces conditions la contrainte de limite élastique (ou contrainte d'écoulement plastique) augmente avec la déformation plastique selon une loi appelée loi d'écrouissage.

Dans le domaine élastique les relations entre les efforts et les déformations sont linéaires (exprimées par la loi de Hooke) alors que dans le domaine plastique ces relations sont non linéaires (figure II.7) Pour le domaine plastique, la relation la plus usuelle est de type puissance (la loi de Swift):

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \text{ où: } k, \varepsilon_0, n, \text{ représentent les constantes du matériau.}$$

Le coefficient n est appelé exposant d'écrouissage.

En dehors de la loi de Swift, différentes relations ont été proposées pour la caractérisation du comportement plastique des métaux. Par la suite sont présentées quelques lois de comportement pour les matériaux à comportement plastique avec écrouissage rencontrés dans la littérature.

La loi de Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

La loi de Ludwick

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon^n$$

La loi de Voce

$$\sigma = \sigma_s [1 - A \exp(-B\varepsilon)]$$

La loi de Marciniak

$$\sigma = A + B \cdot \ln(\varepsilon_0 + \varepsilon)$$

où: k,  $\varepsilon_0$ ,  $\sigma_0$ , A, B, c représentent les constantes du matériau, spécifiques à chaque loi.

La loi d'écrouissage est le plus souvent identifiée dans des essais de traction uniaxiale.

Dans le cas d'une sollicitation quelconque la loi d'écroutissage relie l'évolution  $\sigma(\varepsilon)$  entre la contrainte équivalente  $\sigma$  et la déformation équivalente  $\varepsilon$ . [18]

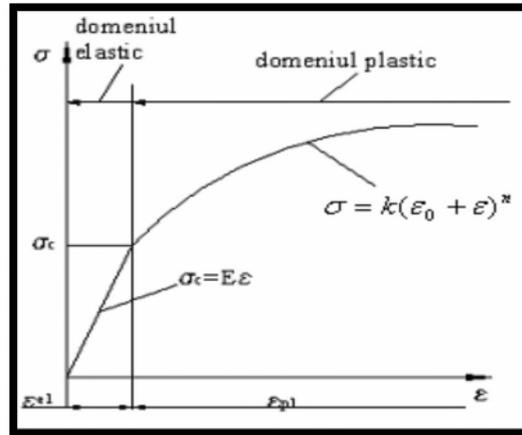


Figure II.7. courbe de traction [18]

## II.11. Les lois de frottements utilisées dans les simulations numériques

Dans les procédés de mise en forme à froid, ce qui est le cas de l'emboutissage le phénomène de frottement joue un rôle important. Plusieurs simulations du procédé ont tenu compte de ce phénomène en proposant des procédures de gestion plus ou moins complexes

### III.11.1. Modèle de Coulomb

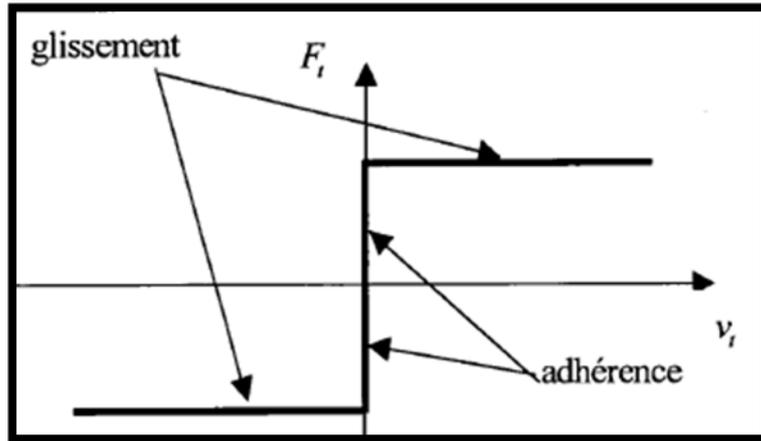
Ce modèle met en jeu un coefficient de frottement qui est le rapport de l'effort tangentiel à l'effort normal exercé par un solide sur l'autre. [4]

$$\text{Si } F_t \leq \mu |F_n|$$

$$\text{Si } F_t < \mu |F_n| \text{ on a } v_t = 0$$

$$\text{Si } F_t = \mu |F_n| \text{ il existe } \lambda \geq 0 \text{ tel que}$$

$$v_t = -\lambda F_t$$



**Figure II.8.** Loi du frottement : Modèle de Coulomb [4]

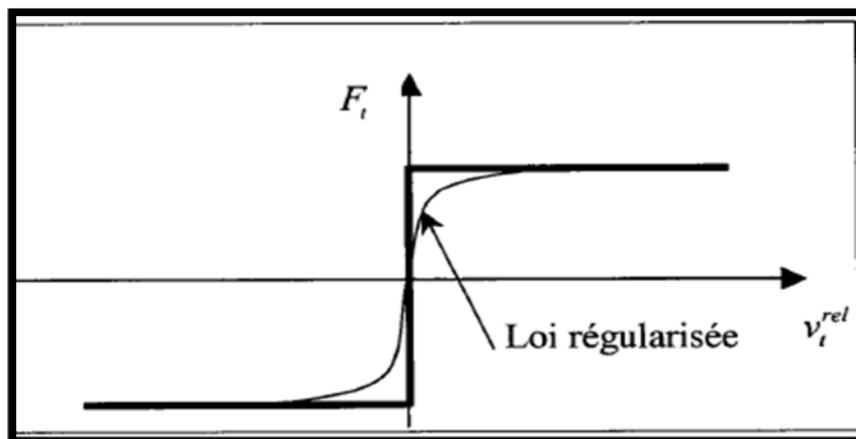
$\mu$  est le coefficient du frottement,  $v_t$  est la vitesse tangentielle du point considéré,  $F_t$  et  $F_n$ , représentent respectivement la composante tangentielle et la composante normale de la force de contact au point étudié. [4]

Cette loi peut être écrite aussi en fonction de la vitesse tangentielle relative ( $v_t^{rel}$ )

$$F_t = -\mu |F_n| \frac{v_t^{rel}}{|v_t^{rel}|}$$

$$F_t < \mu |F_n| \text{ si } v_t^{rel} = 0$$

On remarque que cette loi présente une discontinuité, ce qui va créer des difficultés lors de la simulation numérique. Pour surmonter ces difficultés, des techniques de régularisation sont souvent employées.



**Figure II.9.** régularisation de la loi de frottement [4]

Dans les industries d'emboutissage on utilise rarement les lubrifiants: ceci peut justifier une hypothèse d'invariance du coefficient de frottement

### III.11.2. Modèle de Tresca

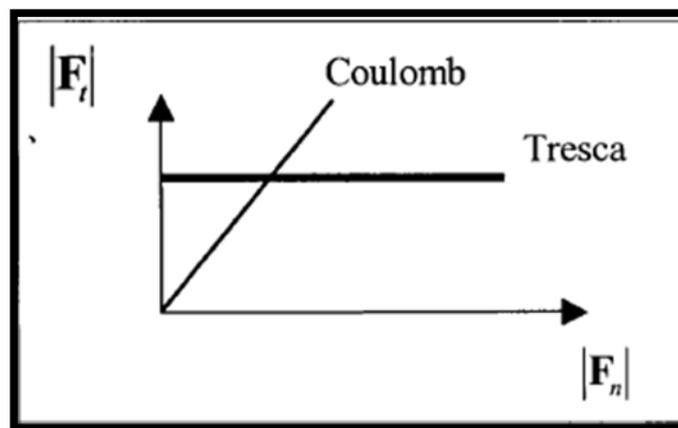
Cette loi s'écrit sous la forme linéaire suivante :

$$\text{Si } F_t < \frac{m}{\sqrt{3}} F_0, v_t^{rel} = 0$$

$$\text{Si } |F_t| = \frac{m}{\sqrt{3}} F_0 \text{ il existe } \lambda \geq 0 \text{ tel que}$$

$$v_t = -\lambda F_t$$

m représente le coefficient de frottement de Tresca.



**Figure II.10.** Modèles de frottement: Coulomb, Tresca [4]

On remarque que le modèle de Tresca présente un seuil de frottement constant. Les forces de Contact tangentiels induites par le frottement sont indépendantes de la réaction normale [4]

## II.12. Les critères de la plasticité

### II.12.1. Critère de Von Mises

Cette condition a été formulée sous la forme suivante: le matériau passe de l'état élastique à l'état plastique quand l'énergie de déformation associée au changement de forme atteint une certaine valeur critique. L'expression générale de ce critère peut être écrite sous la forme:

$$f(J_2) = 0 \text{ ou } J_2 = k^2$$

Le critère Von Mises s'exprime dans l'espace des contraintes principales sous la forme :

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2R_c^2$$

Dans l'espace des contraintes principales  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  ce critère est représenté sous la forme

D'un cylindre à base circulaire. [18]

### II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude sur les aspects métallurgiques et les aspects opératoires, et une recherche effectués pour détecter et améliorer les principaux défauts rencontrés en fin du procédé d'emboutissage tel que la rupture, le plissement, et le retour élastique. Suivi des lois de comportements et lois de frottements.

# **Chapitre III**

## **Simulation numérique**

### **III.1.Introduction**

Dès le stade du bureau d'études et tout au long de la phase de conception, la simulation numérique se comporte comme un outil d'analyse et d'aide à la conception. Elle permet d'évaluer de manière qualitative, voir quantitative les difficultés de faisabilité des pièces, par rapport au cahier des charges, par l'identification des problèmes de striction ou déchirures, de formation de plis et de biens d'autres effets indésirables.

Dans ce chapitre nous simulerons un exemple sur le procédé d'emboutissage en utilisant un code de calcul .

### **III.2.La simulation numérique de procédé d'emboutissage**

L'utilisation des logiciels de simulation numérique devient à l'heure actuelle de plus en plus fréquente. Ces logiciels présentent aujourd'hui un réel intérêt économique (gain de temps, gain sur les coûts de production). Les renseignements apportés sont nombreux. Ils facilitent la prise de décision sur le choix du processus, de la fabrication, des matériaux, etc. Ils assurent également le moyen d'éviter la mise au point de prototypes. Cependant, devant la complexité des phénomènes que l'on désire simuler, la mise en œuvre de ces logiciels reste difficile. Ces logiciels doivent d'une part, être rapides, d'autre part, être capables de reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes observés, l'objectif étant d'obtenir des résultats les plus proches des valeurs expérimentales. [11]

Les non-linéarités matérielles sont dues au caractère particulier des lois de comportement de la structure étudiée. Les non-linéarités liées à l'évolution des conditions aux limites sont issues de l'évolution des conditions aux limites de contact ou de frottement lors de la descente des outils.

Pour qu'une modélisation numérique soit opérationnelle, il faut bien choisir un outil de simulation performant, un code éléments finis.

### III.3.Description du modèle

Le flan est une tôle mince d'acier doux :

#### III.3.1.Données géométriques [17]

- Diamètre de la tôle  $D=126\text{mm}$
- Epaisseur  $h=0.21\text{mm}$
- Profondeur de l'emboutissage  $=3\text{mm}$

Pour les outils

- Rayon de la matrice  $r_m=0.7\text{mm}$
- Rayon de poinçon  $r_p =0.7\text{mm}$
- Jeu  $=0.45\text{mm}$
- Diamètre de l'embouti  $d=108\text{mm}$

#### III.3.2.Données mécaniques [17]

- Le matériau de la tôle est un acier doux
- Module de Young  $E=206000\text{MPa}$
- Coefficient de poisson  $\nu=0.3$

#### III.3.3.La modélisation numérique

La simulation numérique est réalisée sous ABAQUS. Le flan est maillé avec des éléments quadratiques avec 1600 éléments.

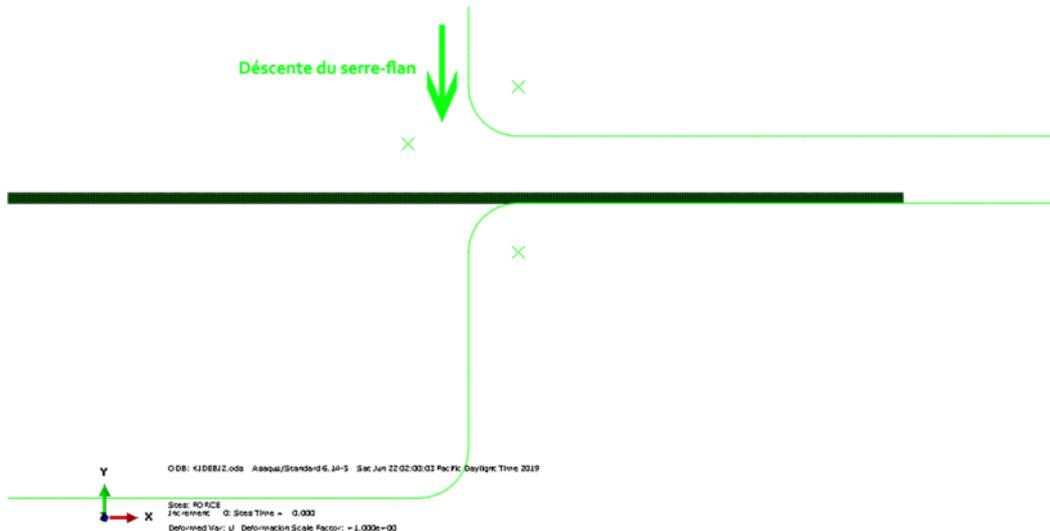
#### Les hypothèses

- ✓ Matériau élastoplastique à écrouissage isotrope ;
- ✓ Outils rigides discrets ;
- ✓ Pilotage en charge du serre-flan ;
- ✓ Pilotage en déplacement du poinçon ;
- ✓ Algorithme statique implicite

### III.4. Les étapes d'emboutissage

Avec un code de calcul ABAQUS, l'emboutissage se déroule en 6 étapes

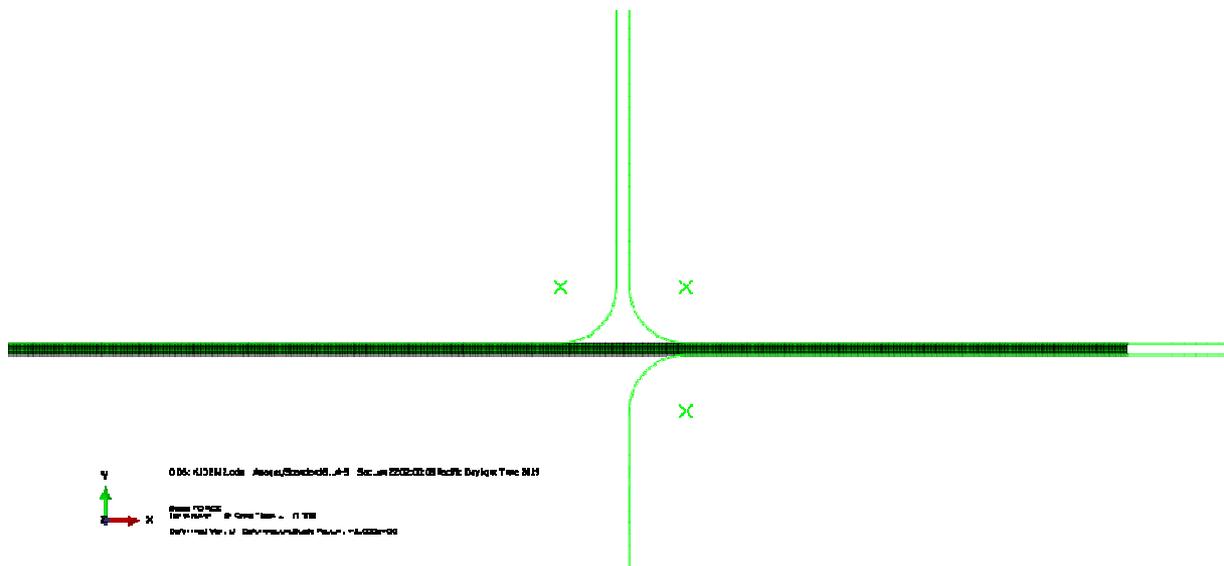
- **1 ère étape** : Application d'effort de serrage



**Figure III.1:** Descente du serre-flan.

Après avoir posé la tôle, le serre-flan descend et applique une pression de -400 kN.

- **2 ème étape** : Descente du poinçon



**Figure III.2:** Descente du poinçon sur la tôle.

Le poinçon descend et se met sur la tôle pour atteindre la configuration initiale.

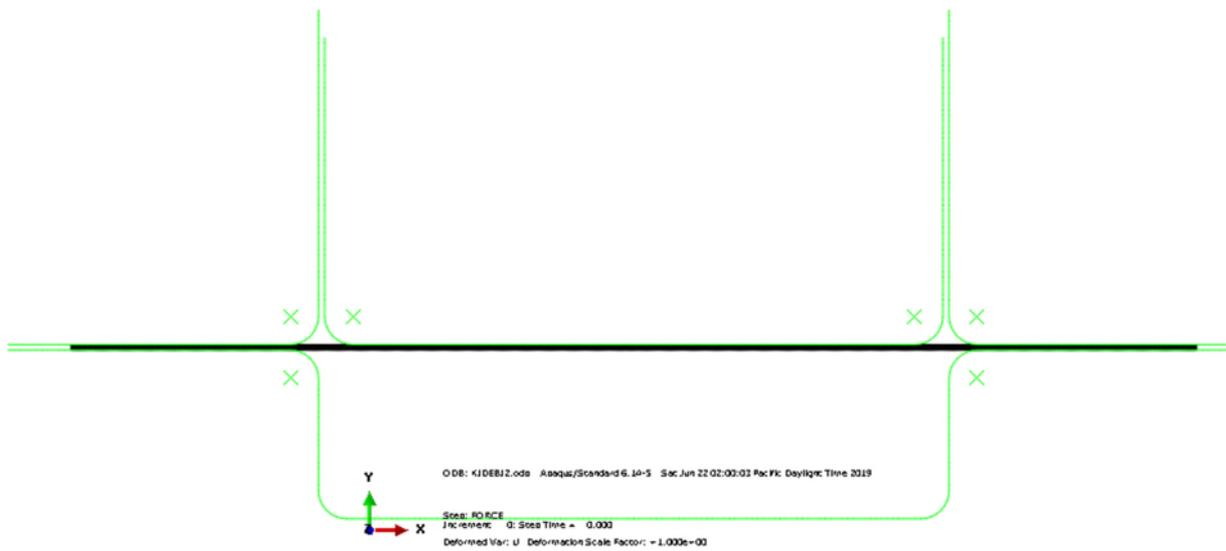


Figure III.3: Configuration initiale de la tôle .

- 3<sup>ème</sup> étape : Le déplacement verticale du poinçon.

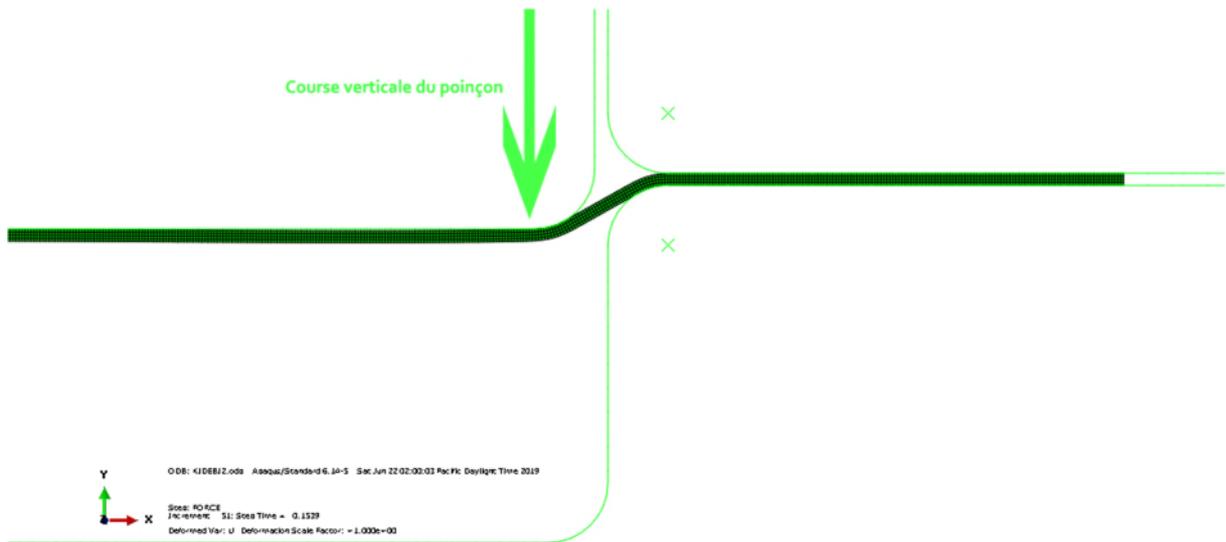


Figure III.4:Etirage de la tôle .

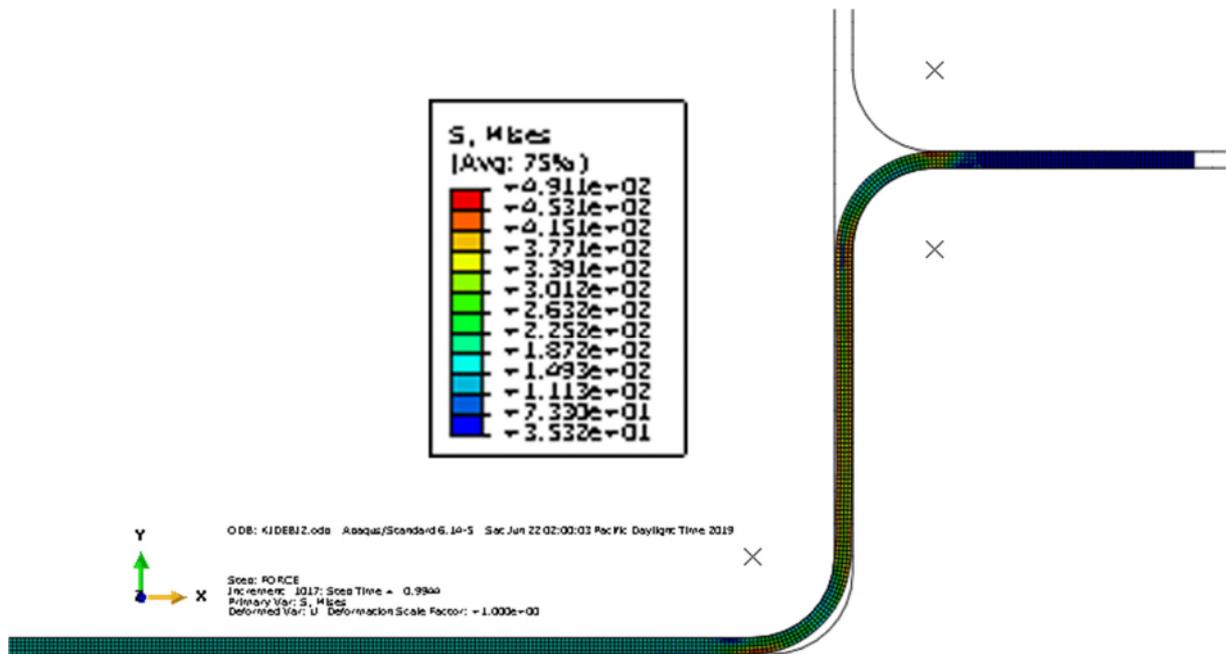


Figure III.5: Etape finale de l'étrissage de la tôle .

Le poinçon commence à descendre, cette étape consiste à exercer une course verticale au poinçon. Par conséquent, la tôle subit un pliage au rayon du poinçon et au rayon de la matrice.

- 4ème étape : Remontée du poinçon

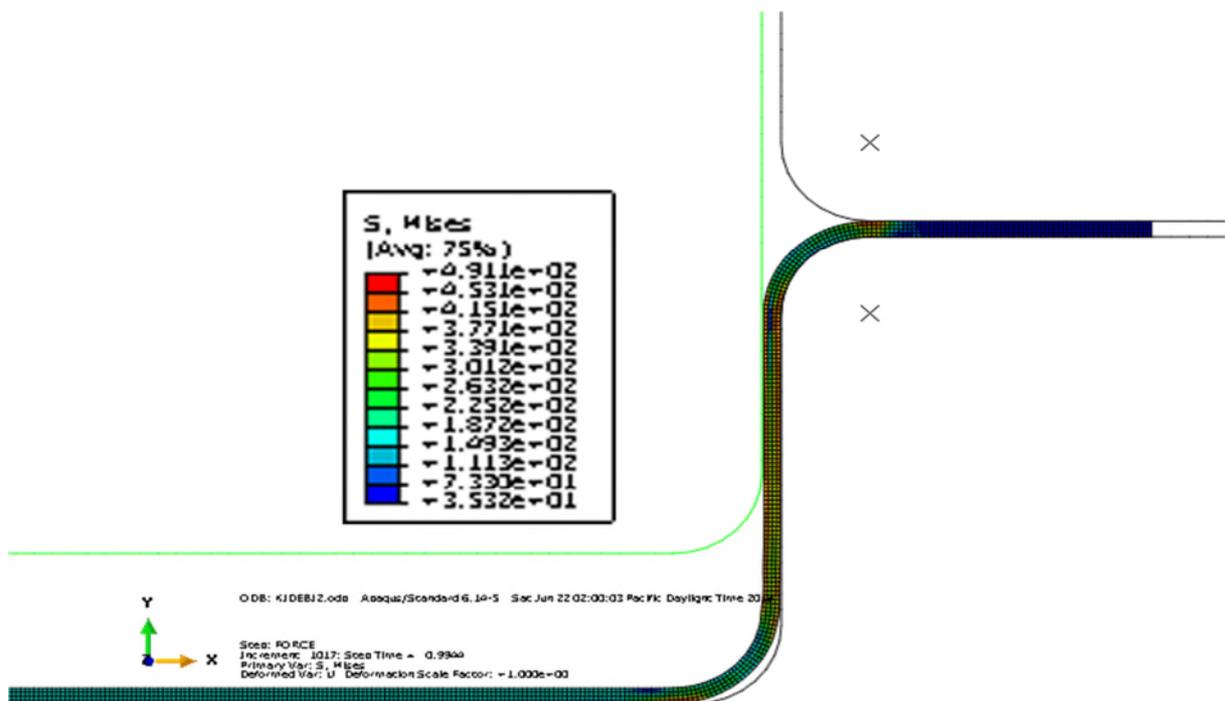
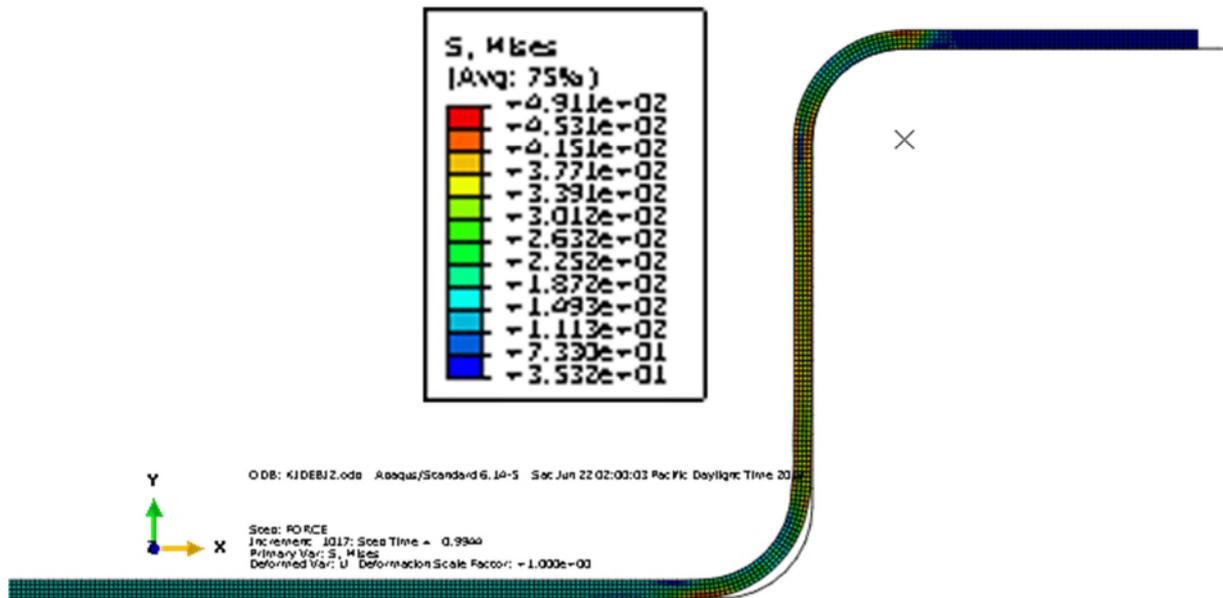


Figure III.6: Remontée du poinçon.

Il s'agit là d'imposer au poinçon un déplacement opposé au précédent jusqu'au retour à sa position initiale, cette étape déclenche la phase du retour élastique.

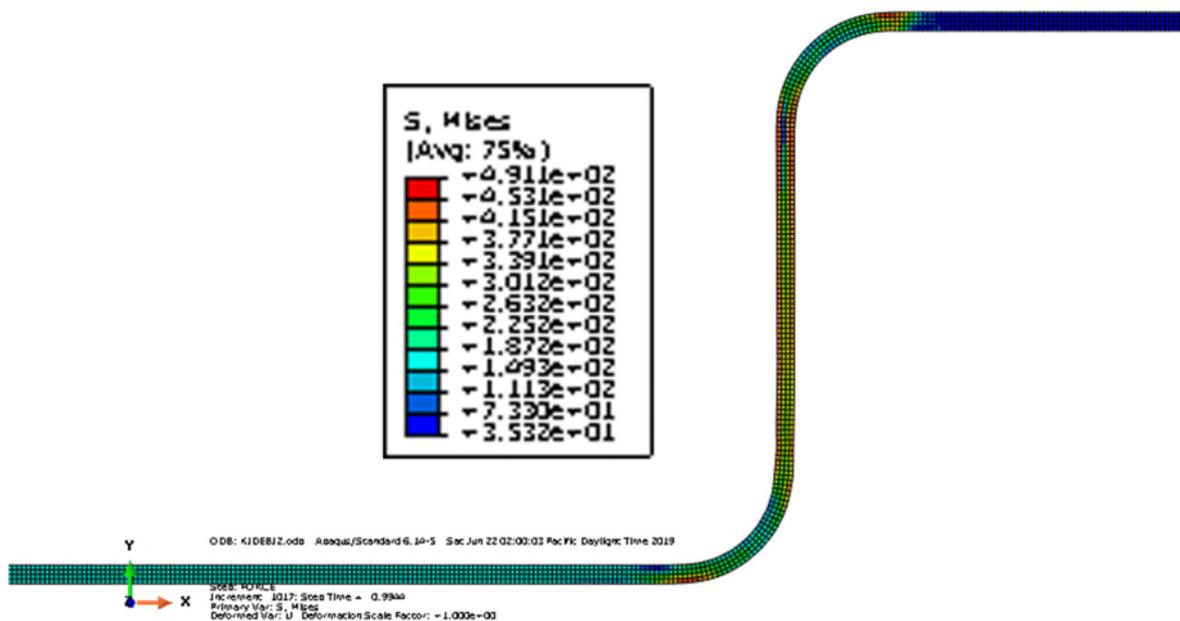
- **5ème étape** : Dégagement du serre-flan :



**Figure III.7:**Dégagement du serre-flan.

Cette étape consiste à soulever les serre-flan, les efforts de serrage sont alors annulés.

- **6ème étape** : Dégagement de la matrice :



**Figure III.8:**Dégagement de la matrice

Cette étape consiste à retirer la matrice, la pièce conserve la forme acquise.

### III.5. La distribution des contraintes

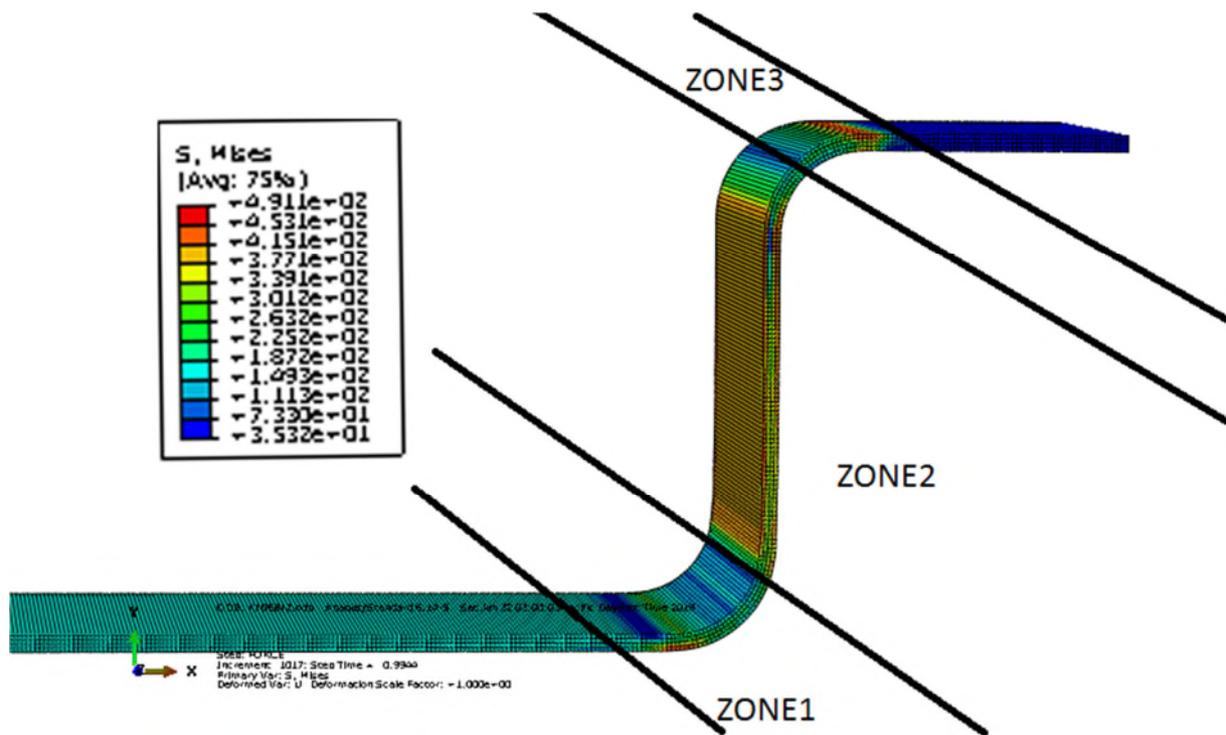


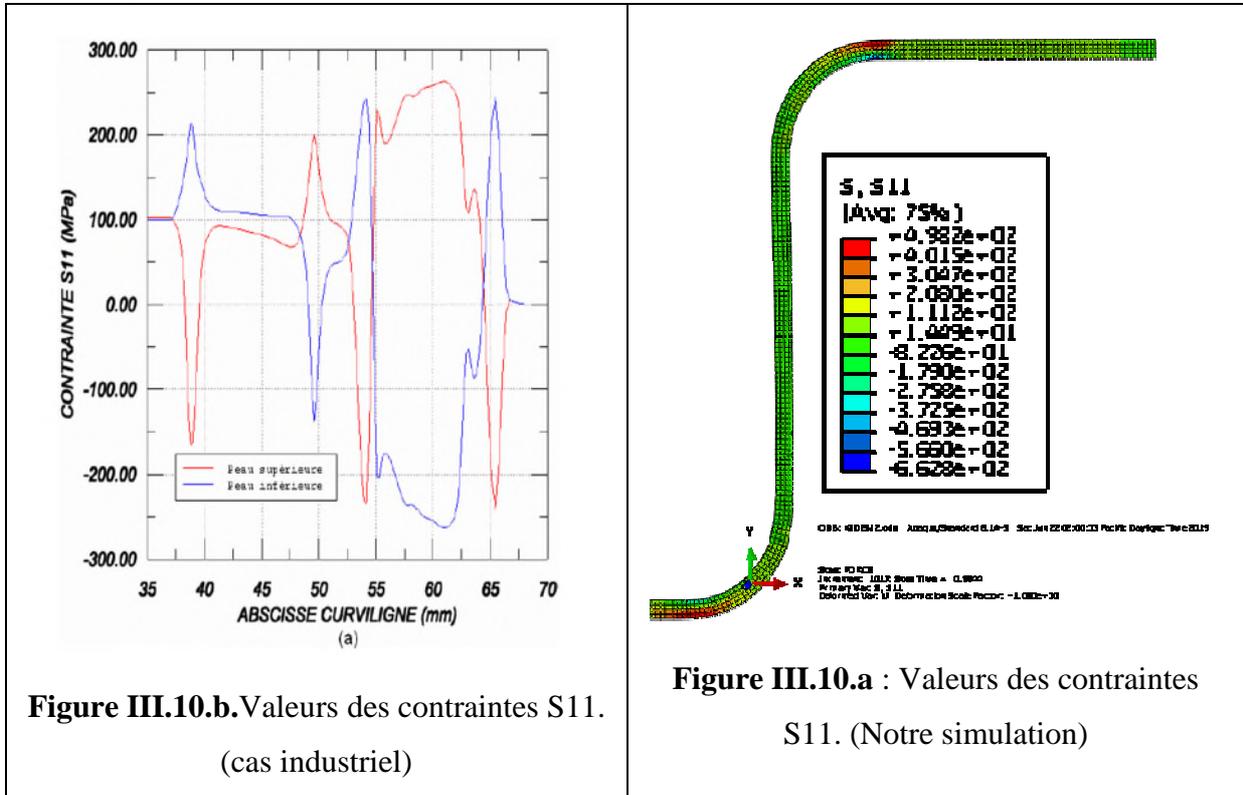
Figure III.9: Distribution des contraintes

D'après les résultats trouvés, on peut répartir les contraintes trouvées en 3 zones :

- Zone 1 : On remarque que la contrainte maximale sur la peau supérieure est nulle, cela est dû à la résultante de compression nulle au point de contact poinçon/tôle. (Deux forces opposées : étirage et pliage.) Par contre, sur la peau inférieure, la contrainte maximale prend une valeur de 410MPa. Ceci est principalement dû à l'étirage important subit par la tôle sur cette partie-là.
- Zone 3 : On remarque un phénomène qui ressemble à celui qu'on a vu sur la peau supérieure de la zone 1, mais ici on le remarque sur la peau inférieure où les contraintes sont très petite comparées à d'autres zones de la tôle, c'est parce que le point de contact devient entre la tôle et la matrice. Alors que la peau supérieure devient de plus en plus tendue où la contrainte maximale atteint une valeur de 490MPa.
- Zone 2 : On remarque aussi que cette zone est très restreinte, elle subit aussi les mêmes forces de pliage et d'étirage mais leur résultante est positive ce qui fait que cette zone-là, subisse de l'étirage où on voit que la valeur de la contrainte dominante sur cette partie est de 320MPa. La zone 2 subit aussi les forces de frottements résultant des contacts tôle/poinçon et tôle/matrice, ce qui explique les contraintes présentes sur la peau supérieure de la tôle.

**Comparaison des valeurs :**

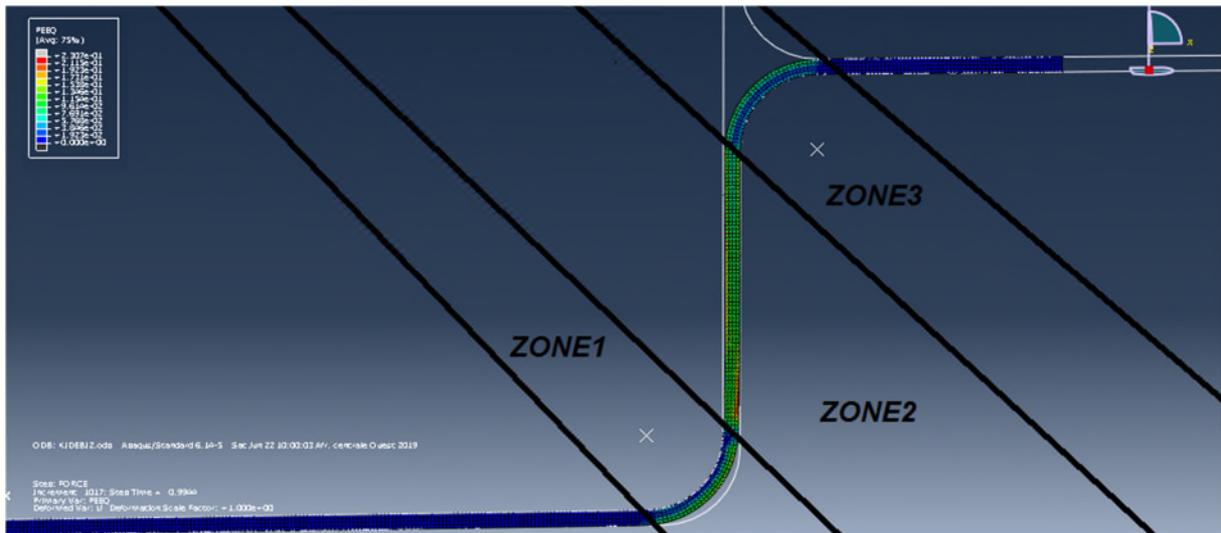
La figure suivante présente les contraintes S11 (Contrainte maximale de compression) de notre modèle et un autre modèle d'acier réalisé sur les presses d'emboutissage BENPACK :



**Figure III.10 : Distribution des contraintes S11.[17]**

On remarque que les valeurs des contraintes des deux modèles sont relativement proches. (270MPa – Figure b et 400MPa – Figure a, la différence est due aux paramètres d'emboutissage différents et d'autres facteurs numériques.) On peut alors constater que les résultats de notre travail sont dans la norme.

### III.6. La distribution des déformations



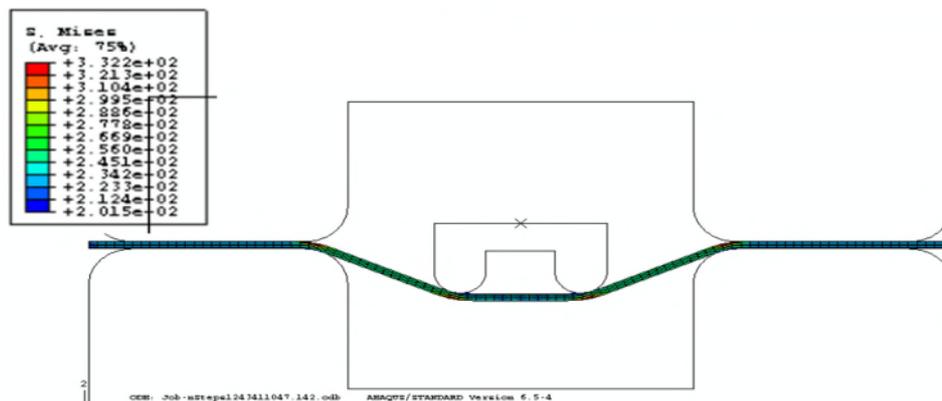
**Figure III.11:** Distribution des déformations

Les déformations, elles aussi peuvent être divisées en trois zones :

- Zone 1 & 3 : La peau supérieure de la zone 3, et inférieure de la zone 1, subissent des déformations de 20%. Comme on a vu avec les contraintes, cela est dû aux forces d'étirage.
- Zone 2 : C'est la zone qui se déforme le plus ou du moins d'une façon constante continuellement sur une partie de la tôle. C'est parce que c'est la partie qui absorbe le plus de forces d'étirage et frottements tôle/poinçon et tôle/matrice.

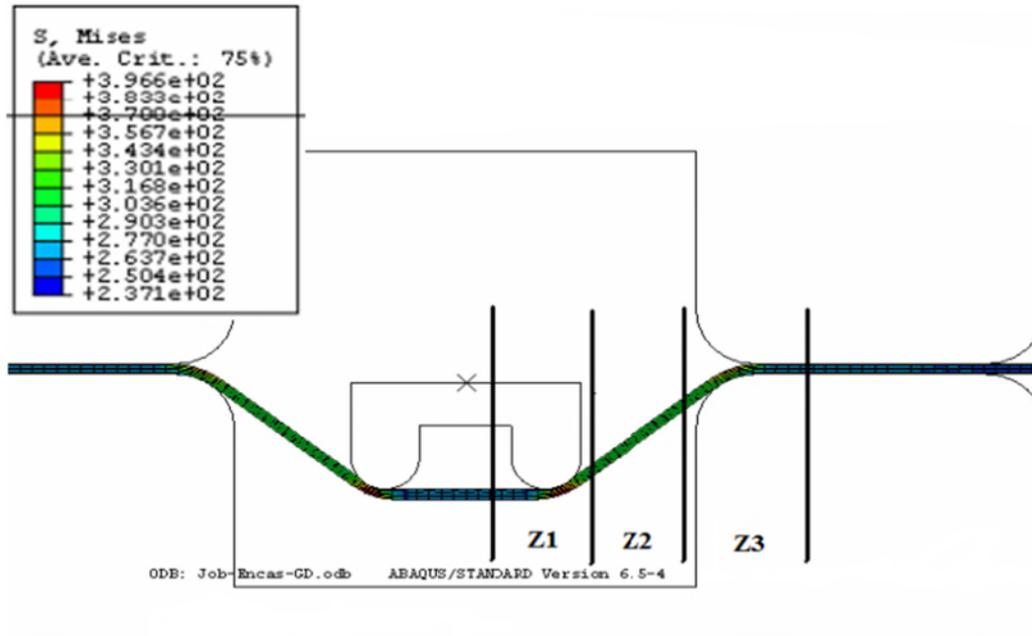
### III.7. Comparaison des résultats

La figure ci-dessous présente les résultats d'une simulation d'emboutissage réalisée dans la thèse « Répartition des déformations en étirage-plier et leurs effets sur le retour élastique » par KHIRANI Dallel. Avec un flan de  $e=0.8\text{mm}$ , en acier, les résultats de cette simulation ont été comme suit :



**Figure III.12:** Un autre résultat numérique de la simulation d'emboutissage [12]

La figure présente la distribution des contraintes de Von Mises, on remarque que les contraintes sont distribuées quasiment de la même manière qu'on a présenté sur la (Figure III.9), où on a trois zones de contraintes comme suit :



**Figure III.13:** Les trois zones de distribution de contraintes.

Les trois zones présentent les mêmes résultats qu'on a analysés auparavant :

- Zone 1 & zone 3 :
  - ✓ Contrainte nulle sur la peau inférieure de la zone 3 et sur la peau supérieure de la zone 1. (Résultante de compression nulle).
  - ✓ Contrainte maximale de 396MPa sur la peau inférieure de la zone 1 et supérieure de la zone 3.

On note que les valeurs des contraintes qu'on a trouvé 490MPa et celles qu'on présente dans cet exemple 396MPa sont assez proches (les deux sont de l'ordre  $10^2$ ) et la petite différence entre les deux est due à la différence de diamètres.

- Zone 2 : Contraintes de 290MPa également présente tout au long de la zone.

En comparant les résultats présentés ci-dessus, on peut constater que les deux simulations présentent des données similaires.

### III.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une simulation du procédé d'emboutissage sur un test qui a été proposé à la conférence internationale Numisheet en utilisant code de calcul . En employant la méthode standard/statique implicite, nous avons choisi de montrer les

contraintes et les déformations comme données de sortie pour ce travail. En comparant nos résultats à un autre exemple numérique réalisé auparavant, qui ressemble à notre modèle. On peut conclure que notre simulation est réussie car les résultats présentés dans ce travail sont correctes vu que la distribution des contraintes et des déformations sont presque identiques.

# **Conclusion générale**

## Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté une étude bibliographique pour décrire le procédé d'emboutissage pour le situer parmi l'ensemble des procédés de mise en forme existants et montrer son importance sur le plan économique (utilisation en industrie, les essais de caractérisation, les paramètres du procédé, ...).

Ensuite, Nous avons présenté une synthèse des travaux récents de recherche effectués qui traitent en général la détection et l'amélioration des principaux défauts rencontrés en emboutissage tels que la rupture, le plissement et le retour élastique, en optimisant les principaux paramètres rentrant en jeu tels que ( la forme initial du flan, l'effort de serrage, les propriétés du matériau, la géométrie des outils).

Nous avons terminé ce travail par une simulation numérique en utilisant un code de calcul dans le but de maîtriser cette technique qui a un impact intéressant sur la maîtrise des procédés de mise en forme. A travers ces résultats, nous avons pu suivre la variation des déformations dans différentes zones de la tôle. Nous avons ainsi conclu que la concentration des déformations maximales est située dans la zone de contact entre le rayon du poinçon et le rayon de la matrice, ce qui est validé par théorie et par simulation numérique.

- [1] É. Felder, Procédés de mise forme : Introduction...Techniques de l'ingénieur, M 3000, 2000.
- [2] le feuillard technique l'emboutissage de l'aluminium centre de recherche et développement de l'aluminium Québec CANADA.
- [3] conceptec.net description de la technique de transformation des tôles.
- [4] Hammadi ABICHOU. Simulation de l'emboutissage à froid par une méthode asymptotique numérique, thèse doctorat, université de Metz, 2001
- [5] Frédéric Mercier. Contribution à la modélisation de l'emboutissage de tôles minces par l'approche inverse. Mécanique des structures. Université de Technologie de Compiègne, 1998.
- [6] Mourad JERBI. Procédé de mise en forme. Institut supérieure des études technologiques de Nabeul. 2017.
- [7] formage a la presse technique d'ingénieur BT2, 7510, PB7510-3
- [8] Yann Ledoux. Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques. Sciences de l'ingénieur. Université de Savoie, 2005.
- [9] R .Dietrich, G.Facy, E.Hugonnaud, M.Pompidou, J.P.Trotignon tome 2 méthodes fabrication et normalisation AFNOR NATHAN. Livre
- [10] conception et mise en point d'une gamme d'emboutissage. Technique d'ingénieurBT3, B7 540,1995.
- [11] O.Makarova. Définition de protocoles rationnels d'identification de lois de Comportement élastoplastiques : Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage. Thèse de doctorat 2006.
- [12] Dalel KHIRANI. Répartition des déformations en étirage – pliage et leurs effets sur le retour élastique. Université Ferhat ABASS de Sétif. 2010.
- [13] N. Boudeau, Approches méthodologiques, numériques et expérimentales en mise en forme des structures minces, poudre et polymères chargés, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche–Comté, 2003.
- [14] Article sur l'emboutissage , technique de l'ingénieure

## Bibliographie

---

[15] O. Barlet, Contribution à l'optimisation de forme de pièces embouties pour l'industrie de l'automobile, Thèse de doctorat UTC, Compiègne, France, avril 1998.

[16] K. Debray, F. Bogard, Y. Li, Y. Q. Guo, Optimisation des surfaces additionnelles en emboutissage des tôles minces. 17ème Congrès Français de Mécanique Troyes, 2005.

[17] Toufik SEDRAT « Étude et conception d'un procédé d'emboutissage

Appliqué aux moules d'emboutissage pour emballage métallique » thèse de magistère, 2007.

[18] Monica IORDACH, contribution à la simulation du processus de déformation plastique à froid des tôles, thèse doctorat, université de METZ 2007.

[19] Service des Études et des Statistiques Industrielles (Sessi) du Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie; La sous-traitance en chiffres (métaux, plastiques, caoutchouc, électronique), Dossiers sectoriels, téléchargeable <http://www.industrie.gouv.fr/sessi/>, 2004.

## **Résumé**

Dans ce travail nous avons étudié la distribution des contraintes et l'évolution des déformations dans des différentes zones de la tôle. La première partie est consacrée à l'étude bibliographique sur le principe d'emboutissage et ses techniques. Dans la deuxième partie nous avons présenté une description de l'aspect métallurgique et l'aspect opératoire et les défauts rencontrés en emboutissage. Enfin nous avons finalisé ce travail avec une simulation numérique de procédé d'emboutissage en utilisant le code de calcul.

**Mots clés :** Mise en forme, Emboutissage, Logiciel.

## **Abstract**

In this work we have studied the distribution of stress and the evolution of deformations in different zones of the sheet. In the first part is dedicated to the study bibliography on the principle of Deep-Drawing and its technique. In the second part we presented a description of the metallurgical aspect and the operative aspect and the defects meet in Deep-Drawing. Finally we finalized this work with a numerical simulation of process Deep-Drawing using with the help.

**Key words:** Forming, Deep-Drawing Software.