

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Spécialité :** Construction Mécanique

**Thème**

### Contribution à l'amélioration d'emboutissage par approche numérique

Préparé par :

Messieurs AZZOUZ Belarbi et KELOUCHE Kadda

Soutenu publiquement le : 19/09/2021, devant le Jury composé de :

M <sup>me</sup> SLIMANI Halima	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun - Tiaret)	Président
M. MADANI Ahmed	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun - Tiaret)	Examineur
M. AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun - Tiaret)	Examineur
M. HADDOUCHE Kamel	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun - Tiaret)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

# DÉDICACE

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*Nos chers parents*

*Nos frères et sœurs*

*Toutes nos familles*

*Tous nos amis.*

# *Remerciements*

Tout d'abord nous remercions avant tout Allah le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous remercions vivement notre Directeur du mémoire de Master Monsieur HADDOUCHE Kamel, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et Directeur du Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles, de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nos vifs remerciements aux Membres du Jury pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements aux Enseignants qui ont contribué à notre formation durant les cycles de Licence et Master.

Un grand merci à toute personne qui a contribué au succès de notre travail et qui nous a aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à témoigner notre gratitude à nos familles pour leur soutien inestimable.



# **Table des matières**



**Nomenclature****Liste des figures****Liste des tableaux****INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1****Chapitre I : Généralités sur le procédé d'emboutissage****I.1 INTRODUCTION ..... 2****I.2 GÉNÉRALITÉS SUR LA MISE EN FORME DES MATÉRIAUX ..... 2****I.3 MISE EN FORME PAR EMBOUTISSAGE ..... 3****I.3.1 Définition ..... 3****I.3.2 Principe de l'emboutissage et applications industrielles ..... 4****I.3.3 Aspects techniques d'emboutissage ..... 6****I.4 TECHNIQUES D'EMBOUTISSAGE ..... 10****I.4.1 Emboutissage à froid ..... 10****I.4.2 Emboutissage à chaud ..... 11****I.5 ESSAIS SIMULATIFS D'EMBOUTISSAGE ..... 11****I.5.1 Essais à dominante expansion ..... 11****I.5.2 Essais à dominante rétreint ..... 12****I.5.3 Essais à caractère mixte ..... 13****I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'EMBOUTISSAGE ..... 13****I.6.1 Avantages de l'emboutissage ..... 13****I.6.2 Inconvénients de l'emboutissage ..... 13****Chapitre II : Défauts et aspects opératoires d'emboutissage****II.1 INTRODUCTION ..... 15****II.2 BRÈVE PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE CIBLE ..... 15****II.3 PRÉVISION DES DÉFAILLANCES LORS DU FORMAGE : ..... 16****II.3.1 Défauts rencontrés en emboutissage : ..... 18****II.3.2 Critères d'acceptation : ..... 19****II.4 ASPECTS OPERATOIRES : ..... 21****II.4.1 Paramètres liés à la presse : ..... 21****II.4.1.1 Jeu entre le poinçon et la matrice : ..... 21****II.4.1.2 Vitesse d'emboutissage : ..... 22****II.4.1.3 Pression du serre-flan : ..... 23****II.4.1.4 Effort d'emboutissage : ..... 23**

II.4.2	Rayon de la matrice : .....	23
II.4.3	Paramètres liés au poinçon : .....	24
II.4.3.1	Rayon du poinçon : .....	24
II.4.3.2	Arrondi sur le poinçon : .....	25
II.4.4	Taille du flan : .....	25
II.4.5	Paramètres de réglage .....	25
 <b>Chapitre III : Approche numérique pour l’emboutissage cible</b>		
III.1	INTRODUCTION : .....	28
III.2	INTÉRÊT DES APPROCHES NUMÉRIQUES : .....	28
III.3	DIFFÉRENTS NIVEAUX D’INVESTIGATION : .....	29
III.4	APPROCHE NUMÉRIQUE POUR L’EMBOUTISSAGE CIBLE : .....	30
III.4.1.	Défauts de l’embouti cible : .....	30
III.4.2.	Approche numérique : .....	31
III.4.3.	Loi de comportement du flan : .....	33
III.4.4.	Simulation numérique : .....	34
III.4.4.1.	Création des géométries des éléments : .....	34
III.4.4.2.	Paramètres de comportement du flan : .....	35
III.4.4.3.	Maillage de l’assemblage flan-matrice-poinçon : .....	36
III.4.4.4.	Étapes de simulation : .....	37
III.4.4.5.	Définition des interactions : .....	38
III.4.4.6.	Chargement et conditions aux limites : .....	38
III.4.4.7.	Lancement de la simulation : .....	39
III.4.4.8.	Unités dans Abaqus : .....	39
III.4.4.9.	Résultats de simulation : .....	40
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....		<b>50</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....		<b>51</b>



# **Nomenclature**



Symbole	Désignation
$A, B$	Paramètres de la loi de Johnson-Cook [MPa]
$C, m$	Paramètres de la loi de Johnson-Cook
$D$	Diamètre du flan [mm]
$d$	Diamètre du poinçon [mm]
$d_n$	Diamètre du poinçon à la n <sup>ème</sup> passe [mm]
$e_0$	Epaisseur du flan à l'état initial [mm]
$e_f$	Epaisseur du flan à l'état final [mm]
$h$	Hauteur du flan [mm]
$H$	Hauteur ou longueur d'emboutissage [mm]
$J$	Jeu entre la matrice et le poinçon [mm]
$k$	Coefficient fonction du rapport (d/D)
$\bar{k}$	Paramètre de la loi de comportement puissance [MPa]
$n$	Indice d'écroissage
$p$	Pression de la presse [MPa]
$Q$	Effort de serrage [N]
$r_m$	Arrondi sur la matrice [mm]
$R_m$	Résistance à la rupture en traction du flan [MPa]
$r_p$	Arrondi sur le poinçon [mm]
$S$	Surface de l'embouti [mm <sup>2</sup> ]
$T$	Température [K]
$T_0$	Température de référence [K]
$T_{fus}$	Température de fusion [K]
$\sigma$	Contrainte [MPa]
$\varepsilon$	Déformation
$\varepsilon_3$	Déformation selon l'axe vertical (Axe Z)
$\dot{\varepsilon}_0$	Vitesse de déformation de référence [s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation [s <sup>-1</sup> ]





# Liste des figures



## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Procédés de mise en forme d'un matériau [2].....	2
<b>Figure I.2</b> : Schéma de principe de l'emboutissage [4].....	3
<b>Figure I.3</b> : Phase 1 d'emboutissage [6].....	4
<b>Figure I.4</b> : Phase 2 d'emboutissage [6].....	5
<b>Figure I.5</b> : Phase 3 d'emboutissage [6].....	5
<b>Figure I.6</b> : Phase 4 d'emboutissage [6].....	5
<b>Figure I.7</b> : Exemples de produits emboutis.....	6
<b>Figure I.8</b> : Outils d'emboutissage [7]. .....	7
<b>Figure I.9</b> : Principaux modes de déformation [7]. .....	7
<b>Figure I.10</b> : Essai Erichsen normalisé [10].....	12

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Quelques produits fabriqués par la société Stainum.....	15
<b>Figure II.2</b> : Diagramme d'Ishikawa pour les défaillances mécaniques [12]. .....	16
<b>Figure II.3</b> : Défauts pour les procédés de mise en forme [13].....	17
<b>Figure II.4</b> : Défauts d'emboutissage.....	18
<b>Figure II.5</b> : Jeu entre poinçon et matrice [7].....	22
<b>Figure II.6</b> : Variation de l'arrondi sur la matrice [9].....	24
<b>Figure II.7</b> : Ajout pour le détournage [9].....	25
<b>Figure II.8</b> : Jonc de retenue, gradin ou redan [4].....	27

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Produit embouti cible. ....	30
<b>Figure III.2</b> : Flans bruts. ....	30
<b>Figure III.3</b> : Exemple de défauts de l'embouti cible. ....	31
<b>Figure III.4</b> : Géométrie du flan.....	34
<b>Figure III.5</b> : Géométrie de la matrice. ....	34
<b>Figure III.6</b> : Géométrie du serre-flan.....	35
<b>Figure III.7</b> : Géométrie du poinçon. ....	35
<b>Figure III.8</b> : Propriétés du matériau de flan (Acier inoxydable 304). ....	36
<b>Figure III.9</b> : Maillage de l'assemblage flan-matrice-poinçon. ....	37
<b>Figure III.10</b> : Positionnement du flan pour emboutissage.....	37
<b>Figure III.11</b> : Définition des interactions. ....	38

<b>Figure III.12</b> : Conditions aux limites pour la matrice. ....	39
<b>Figure III.13</b> : Conditions aux limites pour le poinçon.....	39
<b>Figure III.14</b> : Contraintes de Von-Misès sur l'embouti en acier inoxydable 201. ....	40
<b>Figure III.15</b> : Contraintes de Von-Misès sur l'embouti en acier inoxydable 304. ....	40
<b>Figure III.16</b> : Contraintes de Von-Misès sur l'embouti en acier inoxydable 304L.....	41
<b>Figure III.17</b> : Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 201. ....	41
<b>Figure III.18</b> : Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 304. ....	42
<b>Figure III.19</b> : Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 304L.....	42
<b>Figure III.20</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une vitesse de 13,158 mm/s. ....	43
<b>Figure III.21</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une vitesse de 52,632 mm/s. ....	43
<b>Figure III.22</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une vitesse de 13,158 mm/s. ....	43
<b>Figure III.23</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une vitesse de 52,632 mm/s. ....	44
<b>Figure III.24</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une vitesse de 13,158 mm/s. ....	44
<b>Figure III.25</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une vitesse de 52,632 mm/s. ....	44
<b>Figure III.26</b> : Evolution des contraintes de Von-Misès avec la vitesse du poinçon.....	45
<b>Figure III.27</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une épaisseur de 0,6 mm. ..	46
<b>Figure III.28</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une épaisseur de 0,7 mm. ..	46
<b>Figure III.29</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une épaisseur de 0,6 mm. ..	46
<b>Figure III.30</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une épaisseur de 0,7 mm. ..	47
<b>Figure III.31</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une épaisseur de 0,6 mm. ..	47
<b>Figure III.32</b> : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une épaisseur de 0,7 mm. ..	47
<b>Figure III.33</b> : Evolution des contraintes de Von-Misès avec l'épaisseur du flan.....	48



# **Liste des tableaux**



**Chapitre III**

**Tableau III.1** : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 201) [18]..... 36

**Tableau III.2** : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 304) [19]..... 36

**Tableau III.3** : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 304L) [20]. ..... 36

**Tableau III.4** : Choix des unités. .... 40

**Tableau III.5** : Composition chimique des aciers inoxydables 304 et 201 [21]. ..... 49



# **Introduction générale**



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée à un matériau. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, etc.) ; les techniques diffèrent selon les matériaux utilisés.

Pour les matériaux métalliques, l'emboutissage et plus généralement tous les procédés d'obtention de pièces manufacturées par déformation plastique sont largement utilisés en fabrication mécanique et progressent technologiquement sans cesse pour s'accaparer des marchés. Les avantages économiques et techniques du procédé d'emboutissage sont indéniables : productivité élevée, géométrie et qualité mécanique des pièces, et faible taux de rebut. Afin de répondre aux besoins industriels en termes de qualité et de compétitivité, de nombreux travaux ont été consacrés à la simulation numérique de ce procédé pour optimiser et assurer la faisabilité du produit embouti.

Comme une contribution à répondre au souci industriel, nous nous intéressons, dans le présent mémoire, au procédé d'emboutissage. Ce dernier consiste à transformer une tôle fine plane en une forme non développable au moyen de presses mécaniques ou hydrauliques. Dans ce contexte, notre modeste étude devrait servir à répondre à la problématique exprimée par la Société Stainum qui éprouve des difficultés liées au procédé d'emboutissage de flans en aciers inoxydables.

Aussi, le mémoire est organisé principalement en trois chapitres ; à savoir :

✓ Dans le premier chapitre, nous allons aborder des généralités sur la mise en forme des matériaux ; puis, nous allons présenter la définition, le principe et les aspects techniques liés au procédé d'emboutissage. Aussi, nous allons évoquer les techniques, les essais simulatifs, les avantages et les inconvénients du procédé d'emboutissage.

✓ Le second chapitre sera dédié à une brève présentation de l'entreprise cible ; puis, nous allons présenter les principaux défauts rencontrés dans les produits emboutis ainsi que les aspects opératoires qui permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité.

✓ Dans le troisième chapitre, nous allons présenter l'intérêt des approches numériques pour le procédé d'emboutissage. Puis, nous allons évoquer les différents niveaux d'investigation pour la mise au point d'un embouti. Aussi, l'approche numérique adoptée sera relatée ainsi que les résultats de simulation et leur interprétation.



# Chapitre I

## Généralités sur le procédé d'emboutissage



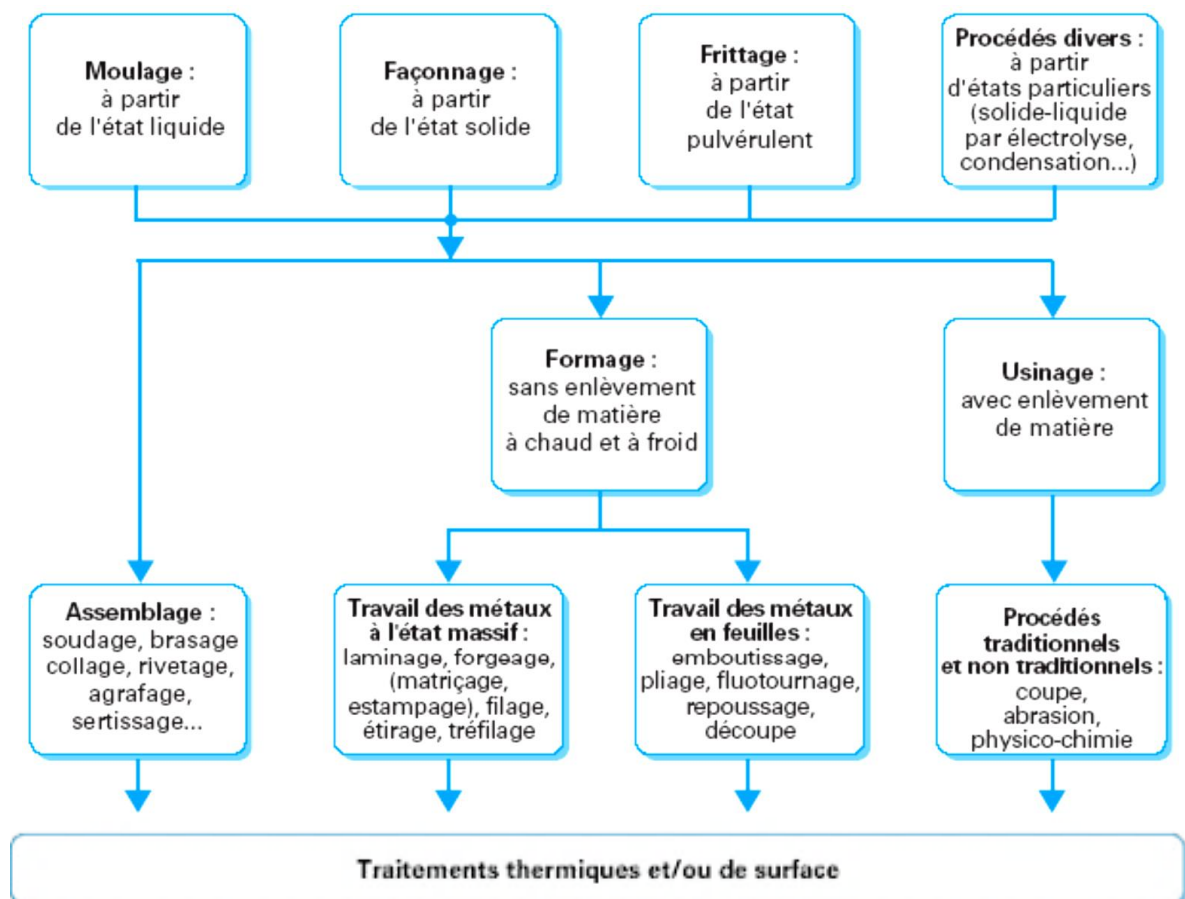


## I.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons aborder des généralités sur la mise en forme des matériaux ; puis, nous allons présenter la définition, le principe et les aspects techniques liés au procédé d'emboutissage. Aussi, nous allons évoquer les techniques, les essais simulatifs, les avantages et les inconvénients du procédé d'emboutissage.

## I.2 GÉNÉRALITÉS SUR LA MISE EN FORME DES MATÉRIAUX

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée à un matériau tout en lui imposant une certaine microstructure afin d'obtenir un objet ayant des propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, ...) ; les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.) [1]. La figure qui suit récapitule les différents procédés de mise en forme des matériaux.



**Figure I.1 :** Procédés de mise en forme d'un matériau [2].

Un procédé de fabrication est un ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation

successive de différents procédés de fabrication [3]. À cet effet, la pièce peut être obtenue :

- par enlèvement de matière ;
- par déformation ;
- par fusion ;
- par assemblage.

L'obtention par enlèvement de matière consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux) ; à cet effet, on rencontre les procédés tels que le tournage, la rectification, le limage, l'électroérosion, les découpages (oxycoupage, laser, jet d'eau, plasma), etc.

Quant à l'obtention par déformation, le matériau est déformé plastiquement jusqu'à l'atteinte de la forme désirée. On retrouve l'estampage, le forgeage, le laminage, **l'emboutissage**, le pliage, etc.

Pour l'obtention par fusion, on rencontre le frittage, le moulage, le soudage, la fabrication additive, etc.

Pour l'obtention par assemblage, on retrouve le collage, le boulonnage, le rivetage, etc.

Dans la présente étude, nous nous intéressons parmi ces procédés de mise en forme à l'emboutissage.

### I.3 MISE EN FORME PAR EMBOUTISSAGE

La mise en forme par emboutissage consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée.

#### I.3.1 Définition

L'emboutissage des tôles minces est une opération qui est habituellement réalisée sous presse double-effet à l'aide d'outillages comprenant :

- un poinçon sur lequel se cambre et se tend le métal ;

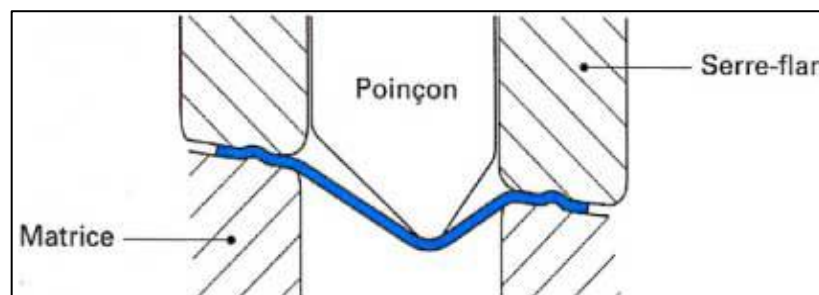


Figure I.2 : Schéma de principe de l'emboutissage [4].

- une matrice servant d'appui au métal et pouvant parfois être une contre-forme (du moins partielle) du poinçon ;
- un serre-flan dont le rôle sera de maintenir la tôle et de freiner l'écoulement du métal vers l'intérieur de la matrice.

### I.3.2 Principe de l'emboutissage et applications industrielles

Le procédé de mise en forme par emboutissage doit son origine à l'Anglais Alexander Parkes (1813-1890) qui réussit en 1859 le premier emboutissage d'un godet en acier, et ce avec la collaboration de Sir Henry Bessemer. Ce procédé permet d'obtenir des pièces de formes complexes non développables contrairement à des opérations plus simples telles que le pliage, le roulage ou le profilage à froid [5].

Le principe de l'emboutissage est basé sur la déformation plastique (allongement ou rétreint) d'un flan plan pour obtenir la forme désirée. L'ébauche en tôle est appelée « Becker », c'est la matière qui n'a pas encore été emboutie [4]. L'emboutissage nécessite l'emploi de presses à emboutir munies d'un dispositif constitué principalement de trois outils : une matrice en creux donnant la forme extérieure de la pièce, un poinçon en relief donnant la forme intérieure, et un serre-flan qui s'applique sur le pourtour du flan et dont l'objectif est de réduire les effets de plissement. Lorsque le serrage est effectif, le poinçon descend à l'intérieur de la matrice entraînant ainsi le métal dans sa course et l'obligeant à épouser son contour sous l'effet des tensions engendrées par la retenue du serre-flan. Le métal à emboutir peut se présenter soit sous forme de bobines (alimentation continue), soit sous forme de flans (plaques prédécoupées de contour circulaire ou polygonal la plupart du temps).

Le procédé d'emboutissage peut comporter une ou plusieurs phases successives ; à savoir :

- **Phase 1** : Poinçon et serre-flan sont relevés ; la tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.

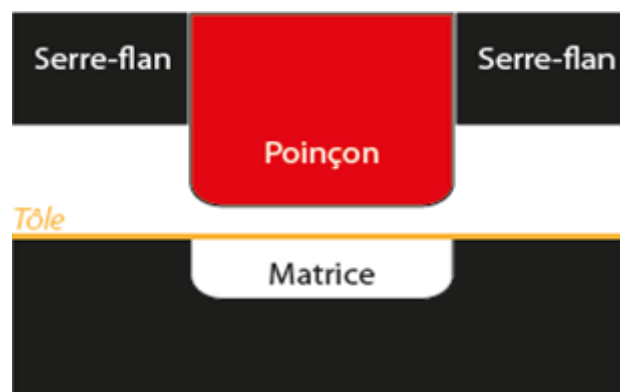


Figure I.3 : Phase 1 d'emboutissage [6].

- **Phase 2 :** Le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée afin de maintenir le tout en lui permettant de fluer.

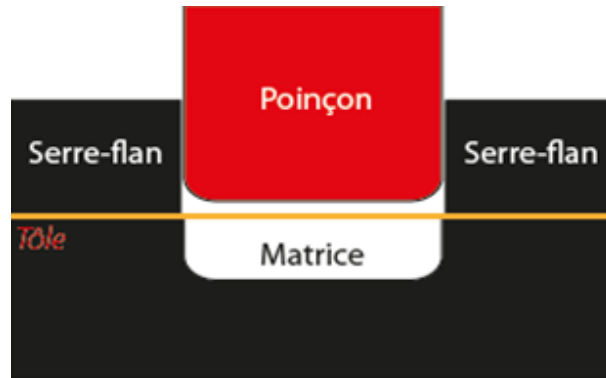


Figure I.4 : Phase 2 d'emboutissage [6].

- **Phase 3 :** Le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.

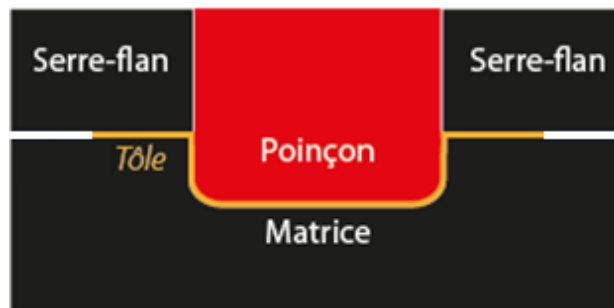


Figure I.5 : Phase 3 d'emboutissage [6].

- **Phase 4 :** Le poinçon et le serre-flan se relèvent ; la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée). La pièce ainsi formée reste au fond de la matrice jusqu'à l'éjection et son détourage.

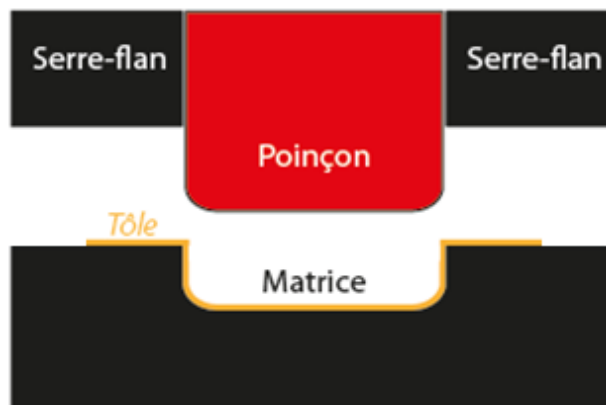


Figure I.6 : Phase 4 d'emboutissage [6].

- **Phase 5 :** 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.

L'emboutissage est un procédé qui trouve son application dans un bon nombre de secteurs d'activité tels que le mobilier métallique, l'électroménager, l'emballage métallique et surtout la carrosserie des véhicules automobiles. Particulièrement développé sur les aciers, ce procédé est aussi applicable avec plus ou moins de facilité à d'autres matériaux, en particulier, l'aluminium [4]. La figure qui suit montre quelques produits réalisés par emboutissage.



Figure I.7 : Exemples de produits emboutis.

### I.3.3 Aspects techniques d'emboutissage

L'opération d'emboutissage est effectuée sur une presse au moyen d'un outillage dont la configuration la plus simple, appelée outil simple-effet (figure I.8-a), comprend deux pièces principales : la matrice et le poinçon. L'une est bridée sur la table fixe, l'autre sur le coulisseau animé d'un mouvement rectiligne alternatif.

L'outillage double-effet comprend en plus un serre-flan qui assure le contrôle de l'écoulement du métal pour prévenir la formation de plis sur la pièce finie (figure I.8-b).

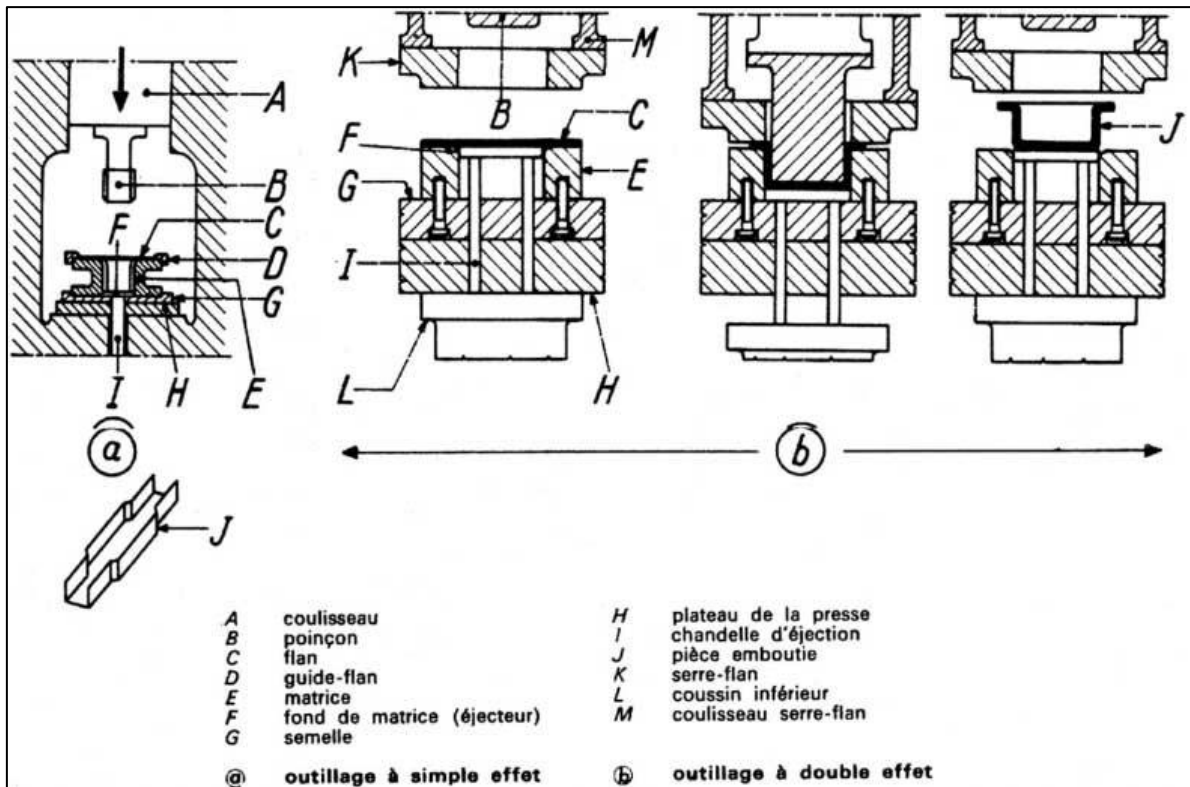


Figure I.8 : Outils d'emboutissage [7].

I.3.3.1 Modes de déformation :

L'emboutissage impose au flan divers modes de déformation, les deux cas limites rencontrés dans la pratique étant : l'expansion et le rétreint [7].

Pratiquement, l'emboutissage par expansion (figure I.9-a) a lieu lorsque le flan est bloqué ; toute la déformation résulte d'une sollicitation de traction-traction et intervient sous le poinçon quelle que soit sa forme. L'expansion se caractérise par un amincissement de la tôle ( $e_f < e_0$  ; soit  $\epsilon_3 < 0$ ).

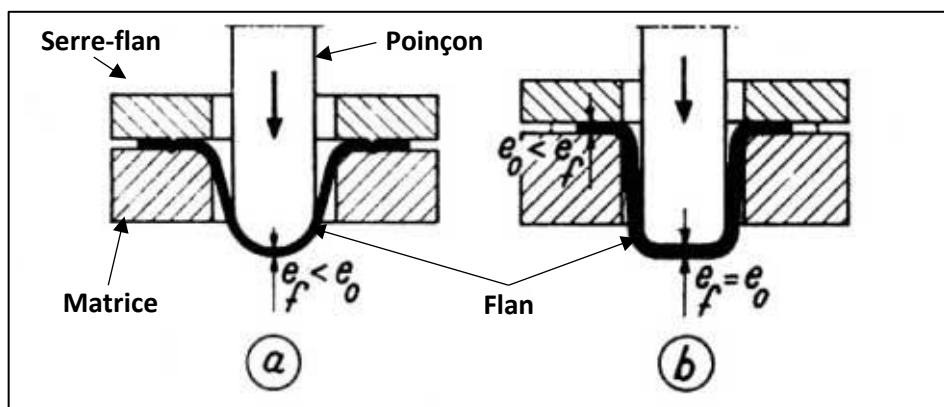


Figure I.9 : Principaux modes de déformation [7].

L'emboutissage par rétreint ou emboutissage profond (figure I.9-b) a lieu lorsque le flan est

libre de glisser sous le serre-flan. La déformation commence sous serre-flan en compression-traction et se poursuit dans l'entrée de la matrice en traction. Le rétreint conduit généralement à un épaississement des parois de la pièce ( $e_f > e_0$  ; soit  $\varepsilon_3 > 0$ ).

L'existence d'une sollicitation de compression-traction dans toute la partie du flan sous serre-flan entraîne le risque de formation de plis préjudiciables soit au bon déroulement de l'opération (rupture de l'embouti), soit à l'aspect final de la pièce (plis écrasés appelés frisures) ; d'où, l'utilisation d'un serre-flan qui applique la tôle sur la matrice, l'obligeant à conserver sa planéité (traction-compression-compression). La rupture d'une pièce en cours d'emboutissage se produit généralement dans les zones de déformation en expansion (rayon de poinçon dans les emboutis profonds).

Pour le métal, il est soumis, au cours de sa déformation, simultanément à deux modes de sollicitation [4] :

- des déformations en expansion sur le nez du poinçon qui s'effectuent au détriment de l'épaisseur ;
- des déformations en rétreint qui résultent d'un écoulement de matière sous serre-flan convergeant vers l'intérieur de la matrice et auxquelles s'associe un champ de contraintes compressif dans le plan de la tôle.

Tout l'art de l'emboutissage consiste en fait à réaliser le meilleur compromis possible entre les déformations des deux types en jouant sur les divers paramètres qui contrôlent l'écoulement du métal dans l'outil.

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux (matrice, poinçon, serre-flan, joncs). 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. Selon la profondeur ou la forme de la pièce, plusieurs passes dans des outils différents peuvent être envisagées.

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

Le choix du procédé dépend du type de presse disponible en atelier (effort de serrage, dimension), de la forme de la pièce, du matériau (acier standard, acier à haute résistance, aluminium, etc.), du nombre total d'opérations pour obtenir la pièce finie, etc. La formabilité de l'acier est améliorée en chauffant légèrement mais il ne faut pas modifier la phase (état

atomique) sinon les propriétés mécaniques sont modifiées (résistance, dureté, etc.). En général, l'emboutissage est une opération de formage à froid, la matrice étant généralement refroidie pour limiter l'échauffement lié au contact. L'emboutissage ne plastifie pas entièrement la pièce, une étude de retour élastique est nécessaire pour assurer l'assemblage final. Aussi, les opérations d'emboutissage posent de gros problèmes de frottement, d'usure et de lubrification.

### I.3.3.2 Paramètres du procédé d'emboutissage

Les principaux paramètres du procédé d'emboutissage sont [8] :

- 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 du serre-flan et les coefficients de frottement ainsi la forme et

la position des joncs.

À noter que 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 élasto-plastique anisotrope du matériau.
- Les contacts et frottements entre les outils et la tôle.

Aussi, la réalisation d'une pièce emboutie suppose que, outre l'opération d'emboutissage proprement dite, on effectue un certain nombre d'opérations complémentaires dites de parachèvement indispensables après emboutissage pour que la pièce réponde à sa destination [4] :

- le calibrage permet de marquer certains détails fins et de réduire la dispersion géométrique ;
- le détourage consiste à séparer la partie utile de la pièce des parties annexes qui lui ont été ajoutées pour en permettre le formage ;
- le tombage bord et le relevage bord ont pour objet de réorienter des zones périphériques qui ont été embouties dans le prolongement des surfaces principales de la pièce pour en faciliter le formage ;
- le poinçonnage et le relevé de collet permettent respectivement de réaliser des trous et d'en relever le bord.



Pour les petites pièces, plutôt que de travailler opération par opération, on préfère généralement réaliser l'ensemble des opérations sur une seule machine :

- soit une presse à poinçons multiples, également appelée presse transfert, sur laquelle sont montés tous les outils de la gamme, les transferts s'effectuant d'un poste à l'autre par un jeu de barres équipées de pinces ou de ventouses ;

- soit une presse à suivre équipée d'outils progressifs dans lesquels le squelette de la bande de découpe porte la pièce d'une opération à l'autre avant d'être éliminé.

Pour les pièces de grande dimension, l'emboutissage s'effectue le plus souvent sur presse double-effet monoposte, les opérations de parachèvement étant réalisées sur des presses simple-effet alignées avec la première ; c'est le cas pour l'ensemble des pièces de robe (c'est-à-dire pièces extérieures de carrosserie) nécessitant 3 à 5 presses de parachèvement. Les presses en ligne qui concourent à la réalisation d'une pièce constituent un ensemble habituellement désigné par l'expression ligne d'emboutissage.

## I.4 TECHNIQUES D'EMBOUITISSAGE

Suivant les caractéristiques mécaniques (conventionnelles et rationnelles) et l'épaisseur des tôles à travailler, on utilise deux techniques d'emboutissage ; à savoir : l'emboutissage à froid et celui à chaud [9].

### I.4.1 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 de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique.

En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes. À ceci, il faut ajouter, d'une part, l'effet d'écrouissage apparaissant lors de la mise en forme et se traduisant par un durcissement structural et une baisse de la ductilité, et, d'autre part, la création de contraintes résiduelles au sein de la pièce finie en limite ses applications (risque de rupture par fatigue).

### **I.4.2 Emboutissage à chaud**

Principalement utilisé sur des presses hydrauliques simple ou double-effet, le formage de fonds de réservoir en acier est le plus important domaine d'application. 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 formation 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. Enfin, cette technique nécessite des mises au point de la sécurité plus importantes.

## **I.5 ESSAIS SIMULATIFS D'EMBOUITISSAGE**

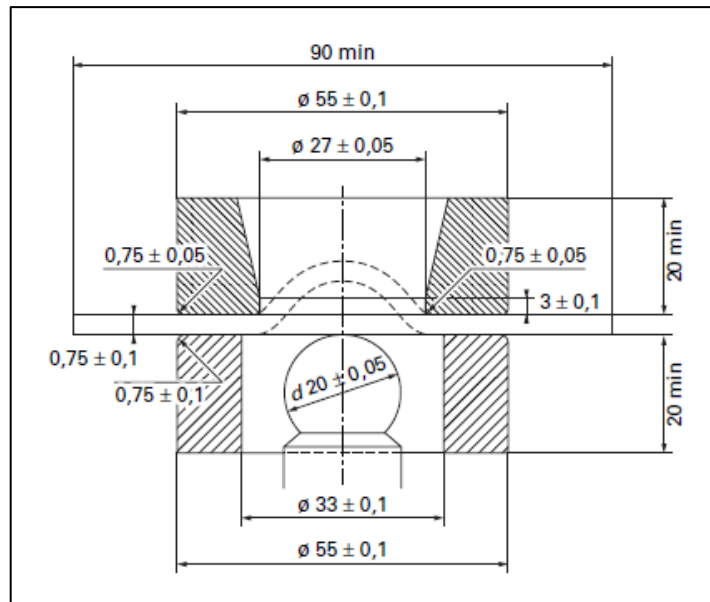
Quand la transformation des tôles par emboutissage a commencé à prendre des dimensions vraiment industrielles (début du XXe siècle), les problèmes de qualité ont amené les utilisateurs et les fabricants à mettre au point des tests leur permettant de juger la qualité de celles-ci vis-à-vis du formage.

L'idée est donc venue, tout naturellement, de réaliser des essais reprenant à petite échelle des opérations qui sont réalisées dans l'industrie de l'emboutissage. Ces tests sont appelés essais simulatifs. Leur nombre est impressionnant, plus d'une centaine certainement, mais dont très peu ont survécu à l'épreuve du temps. Nous ne ferons donc que citer les principaux, qui sont encore en usage limité et, souvent, pour des fonctions qui n'étaient pas celles initialement prévues. On peut les classer en fonction du mode de déformation dominant qu'ils caractérisent [10].

### **I.5.1 Essais à dominante expansion**

Ce sont les plus anciens ; on retrouve l'essai Persoz (1903), l'essai Erichsen (1910), l'essai Olsen (1930) plus particulièrement utilisé aux États-Unis, qui se font sur un poinçon rigide hémisphérique et les essais utilisant une pression hydraulique : Jovignot (1930) et les « bulge tests » en général.

Le plus connu dans la première catégorie, l'essai Erichsen à flan bloqué a longtemps fait partie de la batterie de tests prévus pour la réception des tôles minces pour emboutissage. La figure qui suit schématise l'outillage utilisé dans l'essai Erichsen à flan bloqué.



**Figure I.10 :** Essai Erichsen normalisé [10].

L'indice Erichsen ou indice d'emboutissage (IE) correspond à la profondeur (en mm) de l'embouti lors de l'apparition d'une fissure. Comme il dépend de l'épaisseur du métal, des abaques définis dans les normes de produit permettaient de s'assurer de leur conformité. Le test est très sensible à la lubrification qui modifie le lieu de rupture et qu'il est donc important de bien la contrôler. Il a été éliminé de l'actuelle norme EN 10130 définissant les tôles minces en acier laminé à froid pour emboutissage mais il est encore utilisé, par exemple, pour tester l'adhérence des revêtements métalliques ou la qualité des soudures laser ou molette des flans soudés.

Dans la catégorie des essais d'expansion hydraulique, le test Jovignot n'est plus utilisé (il était trop petit), mais il existe de nombreux appareillages de laboratoire permettant ce genre d'essai appelé « bulge test » en Anglais, le plus souvent dans le but d'établir le côté droit des CLF (Courbe Limite de Formage). On cherche à avoir un diamètre assez grand (100 à 200 mm) pour limiter la courbure de la tôle et rester dans des conditions de contraintes planes. L'avantage de cet essai est d'éliminer totalement l'influence du frottement.

### **I.5.2 Essais à dominante rétreint**

On trouve les essais Guyot (1958) et Guyot modifié (1960), maintenant abandonnés, et surtout l'essai Swift de 1954, modifié en Swift-IDDRG en 1957 puis en 1969. Il s'agit de former un godet cylindrique et de rechercher la plus grande taille de flan circulaire qui peut s'emboutir sans rupture. Des variantes sont utilisées en laboratoire pour juger de l'aptitude au rétreint ou

du pouvoir lubrifiant et en contrôle de fabrication pour tester la qualité de certains revêtements (essentiellement le poudrage des revêtements galvanisés alliés, « galvanized » en Anglais).

### **I.5.3 Essais à caractère mixte**

Il existe des essais à caractère mixte, qui sont :

- L'essai Engelhardt (1959) qui se déroule en deux temps ; on laisse d'abord le métal former un godet par rétreint, puis on bloque fortement la collerette, ce qui permet de connaître par un seul essai la capacité de déformation globale du métal.

- L'essai Swift hémisphérique où l'on forme un godet cylindrique dont le fond est hémisphérique. L'essai fait donc appel simultanément à la formabilité en rétreint et en expansion. Mais Swift lui-même a montré que le résultat dépendait de la géométrie de l'outil.

- L'essai de coupelle conique Fukui ; il est également supposé donner un résultat dépendant des aptitudes à l'expansion et au rétreint du métal. Il est rarement utilisé de nos jours surtout en raison de la difficulté d'usinage des éprouvettes.

- L'essai KWI mis au point par Siebel et Pomp au Kaiser Wilhelm Institut de Düsseldorf en 1929. Il consiste à provoquer l'expansion d'un trou usiné et à mesurer l'augmentation du diamètre à la rupture. Appliqué à des trous poinçonnés, il permet de juger la sensibilité du métal à l'effet d'entaille.

## **I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'EMBOUITISSAGE**

Les avantages et les inconvénients liés à l'emboutissage peuvent être résumés comme suit [11].

### **I.6.1 Avantages de l'emboutissage**

- Pièces minces de formes géométriques complexes.
- Bon état de surface.
- Très bonne qualité esthétique et travaux de finition de polissage moins lourds et moins coûteux.
- Bas prix de revient et cadences de production très élevées.

### **I.6.2 Inconvénients de l'emboutissage**

- Les zones d'étirement subissent un amincissement important et les zones de retrait subissent une combinaison d'effets d'épaississement et de plissement.

- Les phénomènes du retour élastique (après que le poinçon se retire) conduisent à un retrait de la matière. Il est alors nécessaire de recourir à certaines techniques pour corriger ces phénomènes de retour élastique : frappe du rayon, étirage et maintien prolongé du poinçon ou modification de la forme du poinçon.
- Le rayon d'entrée de la matrice doit être très arrondi et poli pour éviter toute déchirure du métal.
- Temps de préparation important.
- Mise au point d'outils (poinçon, matrice) très coûteuse et nécessite un savoir-faire de l'entreprise.



## Chapitre II

# Défauts et aspects opératoires d'emboutissage



## II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons évoquer une brève présentation de l'entreprise cible ; puis, nous allons présenter les principaux défauts rencontrés dans les produits emboutis ainsi que les aspects opératoires qui permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité.

## II.2 BRÈVE PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE CIBLE

L'entreprise cible est une Sarl créée en 2019 et destinée à la fabrication industrielle d'articles de ménage « Delux » ; elle porte le nom « Stainum », et elle est sise dans la zone industrielle d'El-Kerma de la Wilaya d'Oran.

C'est une entreprise qui fabrique des produits de cuisine en acier inoxydable et en aluminium. Ces produits sont des couscoussières, marmites, faitouts, casseroles, poêles, sauteuses, plats de restauration, etc. Aussi, ces produits sont aptes à l'usage sous tout type de feu compte tenu de la distribution homogène de la chaleur, et ce pour une cuisson efficace sans brûler ni coller.



Figure II.1 : Quelques produits fabriqués par la société Stainum.

Cette société éprouve une difficulté technique pour certains produits emboutis ; c'est ainsi qu'à travers la présente étude, nous souhaitons contribuer au dégagement d'une solution par approche numérique pouvant améliorer la qualité des produits et réduire le rebut.

### II.3 PRÉVISION DES DÉFAILLANCES LORS DU FORMAGE :

L'objectif principal des fabricants est l'obtention de produits de qualité avec un taux de défaillance proche de zéro, c'est ce qu'on appelle le principe du zéro défaut introduit pour la première fois par Crosby. On considère qu'une pièce est défaillante à partir du moment où elle ne remplit pas sa fonction ou l'assure de manière dégradée [12].

Il existe plusieurs modes de défaillances mais habituellement on considère quatre catégories : défaillances mineures, défaillances significatives, défaillances critiques, défaillances catastrophiques.

Les origines des défaillances sont multiples pouvant être dues :

- au matériau : défauts de matériau, cristallisation, ségrégation ;
- au procédé de fabrication : pliage, extrusion, emboutissage, etc. ;
- à la conception : sous-dimensionnement, conception imparfaite ;
- à l'exploitation : surcharge, utilisation non conforme ;
- à l'environnement : humidité, température, agressions.

Le diagramme cause-effet d'Ishikawa, représenté par la figure qui suit, résume les plus importantes causes de défaillances mécaniques, parmi lesquelles on peut citer : l'usure, la fatigue des outils, la rupture, la fissuration, le retour élastique, etc.

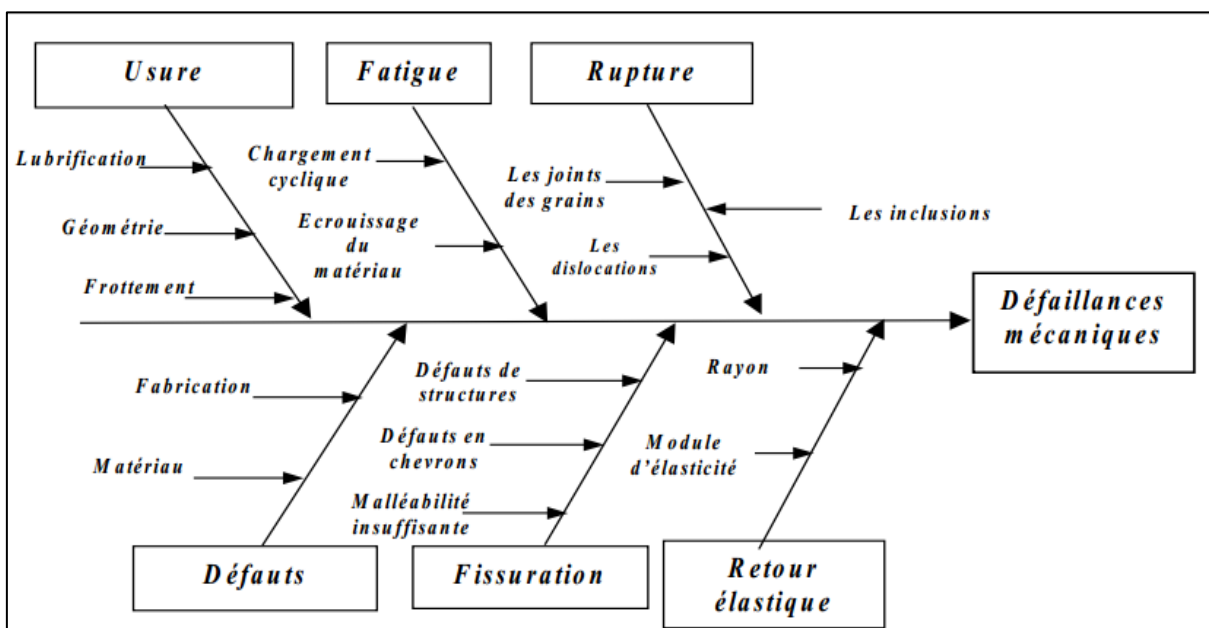
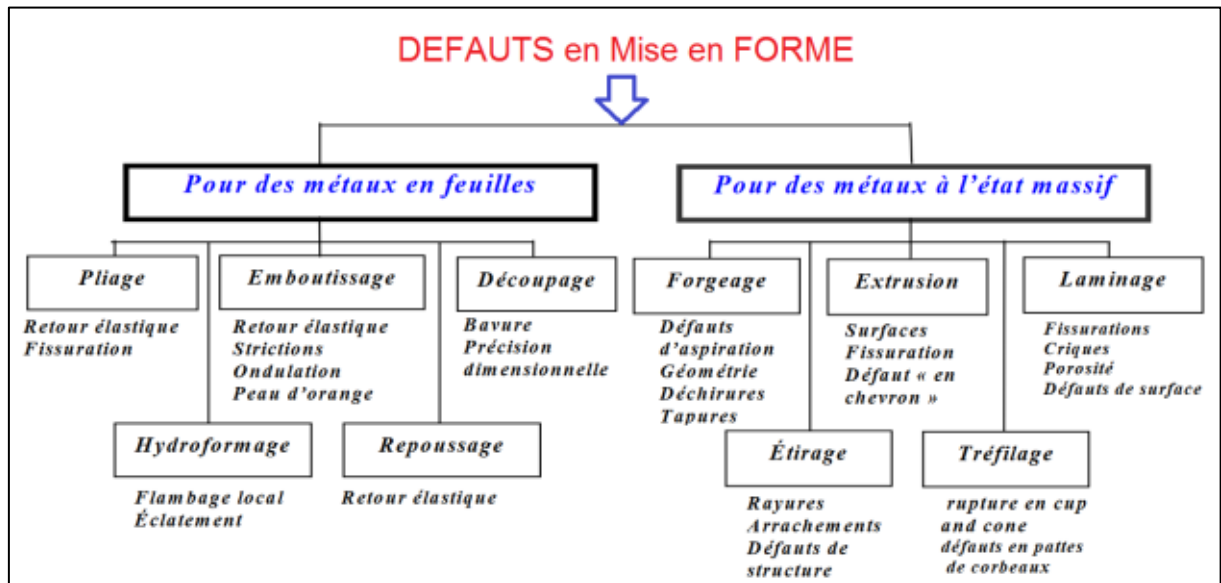


Figure II.2 : Diagramme d'Ishikawa pour les défaillances mécaniques [12].



Sur la figure qui suit, on représente d'une manière synthétique les principaux défauts pour les procédés de mise en forme.



**Figure II.3 :** Défauts pour les procédés de mise en forme [13].

L'optimisation de ces procédés de mise en forme consiste à déterminer les conditions opératoires optimales afin de :

- minimiser ou réduire un mode de défaillance (usure, fatigue, rupture) ;
- minimiser les coûts de production (nombre de passes, chauffage, outillage) ;
- maximiser une performance recherchée (durée de vie de l'outil, résistance des pièces).

En fonction de la géométrie et des caractéristiques recherchées sur une pièce, ainsi que de l'importance des séries à produire, il faut, pour assurer une fabrication, réussir la conjonction des différents facteurs d'influence qui conditionnent la mise au point d'une fabrication. On reconnaît six facteurs d'influence agissant sur le procédé [14], que l'on nomme les « 6 M » ; ces six facteurs d'influence sont :

- Matière : changement de matière première, changement de provenance ou de composition ;
- Main-d'œuvre : changement d'opérateur, fatigue de l'opérateur, inexpérience ;
- Machine : changement de machine ou de réglage ;
- Méthode : changement de gamme de fabrication ;
- Milieu : variations du milieu ambiant (température et humidité) ;
- Moyen de contrôle : précision, incertitude de mesure, traçabilité.

Le fait d'agir sur l'un de ces six facteurs d'influence modifie la dispersion ; les « 6 M »

constituent une méthode d'analyse du procédé, puisque l'action sur l'une des six caractéristiques peut dégrader ou améliorer le procédé de fabrication.

### II.3.1 Défauts rencontrés en emboutissage :

La figure qui suit montre les défauts rencontrés durant le procédé d'emboutissage.



Figure II.4 : Défauts d'emboutissage.

Les défauts qui peuvent être rencontrés pour un procédé d'emboutissage sont regroupés en deux catégories [12] :

- ✓ Défauts structuraux : rupture, zone insuffisamment tendue, striction localisée, fissurations, etc.
- ✓ Défauts de forme : ondulations, formation des plis, peau d'orange, retour élastique, etc.

Les défauts en emboutissage [15] dépendent de :

- La géométrie et la position du flan.
- La géométrie de l'outil (correction du retour élastique).
- La position et la géométrie des joncs de retenue.
- La force de serrage exercée par le serre-flan.
- L'élasticité du matériau de la tôle, sa ductilité et son anisotropie.
- Le lubrifiant, sa nature et sa quantité.
- L'usure des outils (fatigue).

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.

### II.3.2 Critères d'acceptation :

Dans le cas des procédés de mise en forme par emboutissage, les critères d'acceptation peuvent être divers. Ils se rattachent à des problèmes de résistance mécanique, de tolérances dimensionnelles ou de qualité d'aspect de surface. De par le principe même de l'emboutissage, la réalisation d'une pièce est un compromis entre des déformations en rétreint et des allongements en expansion dont les limites respectives sont les phénomènes de plissement et ceux de striction/rupture qui constituent les critères de base de mise au rebut. Mais des causes supplémentaires de rebut peuvent également être prises en considération au niveau des tolérances dimensionnelles, du retour élastique et de l'aspect de surface [14].

✓ **Plis** : On appelle plis les ondulations de la tôle résultant d'un flambement local associé à un champ de contraintes de compression. Généralement associés à des déformations en rétreint, ils peuvent apparaître aussi bien dans les zones de la tôle qui momentanément ne sont en contact ni avec la matrice, ni avec le poinçon que sous serre-flan. Ils peuvent résulter aussi

bien des contraintes de formage proprement dites que des contraintes résiduelles libérées après retrait du poinçon et extraction de la pièce hors de la matrice.

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

✓ **Aspect de surface** : Les défauts d'aspect peuvent être classés en deux catégories :

- Les défauts accidentels (picots, rayures, marquages divers) liés à des incidents survenus au cours de la manipulation des pièces comme au cours du formage et dont la prévention passe par une préparation et un entretien soignés de l'ensemble des moyens de production (propreté des outils, manipulateurs et palettes de stockage adaptées).

- Les défauts systématiques liés à une hétérogénéité de déformation ou au glissement du métal sur le rayon d'entrée de la matrice résultant directement des choix opérés lors de la conception de la gamme et dont l'acceptabilité repose sur la non visibilité des zones correspondantes sur le produit fini.

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

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

## II.4 ASPECTS OPERATOIRES :

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 [9]. Une presse ou une machine de traction ayant pour objectif la réalisation d'emboutis est composée d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre-flan ; ceci offre déjà plusieurs possibilités de réglage ; à savoir :

- la pression du poinçon ;
- la vitesse du poinçon ;
- la pression de serrage au niveau des serres-flan.
- le jeu entre le poinçon et la matrice.

À 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, par exemple, si la vitesse de poinçon est trop faible, la durée de mise en forme d'une pièce dépasserait son niveau de rentabilité.

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

#### II.4.1.1 Jeu entre le poinçon et la matrice :

Lorsque le jeu 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 ( $J$ ) en fonction de l'épaisseur ou la hauteur du flan ( $h$ ). Elles sont basées sur les expressions suivantes [9] :

- Pour l'acier : 
$$J = h + 0,07(10h)^{1/2} \quad \text{(II-1)}$$

- Pour l'aluminium : 
$$J = h + 0,02(10h)^{1/2} \quad \text{(II-2)}$$

- Pour les métaux non ferreux : 
$$J = h + 0,04(10h)^{1/2} \quad \text{(II-3)}$$

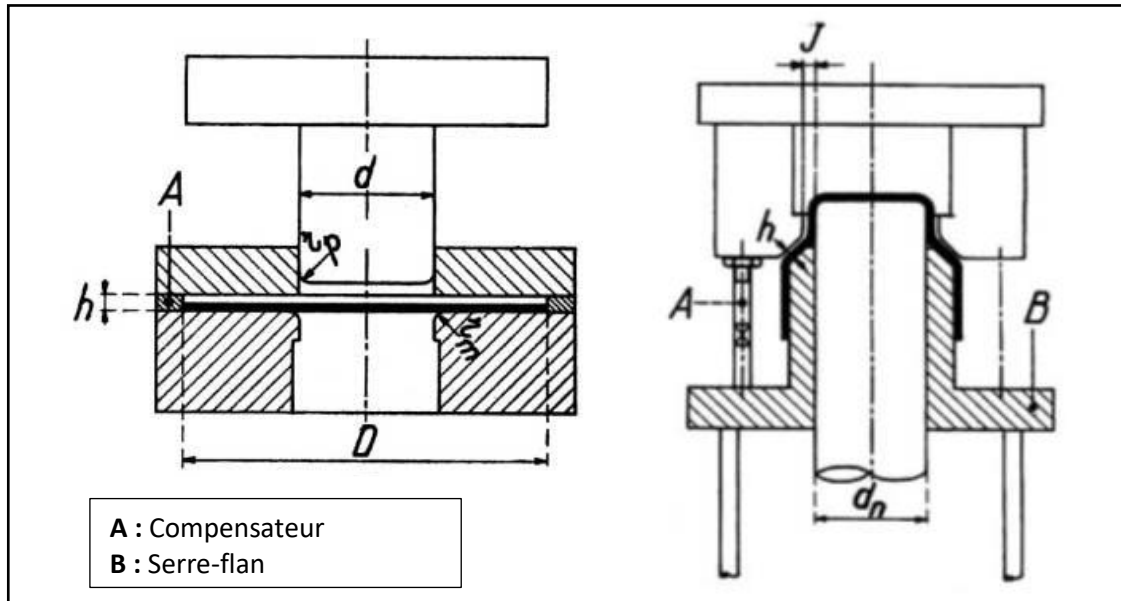


Figure II.5 : Jeu entre poinçon et matrice [7].

Le jeu radial entre le poinçon et la matrice doit être plus grand que l'épaisseur nominale du métal embouti [7] pour tenir compte des tolérances sur l'épaisseur des métaux en feuilles ; soit pour la première passe :

$$h < J < h\sqrt{D/d} \quad (\text{II-4})$$

Pour les passes suivantes, on a :

$$h < J < h\sqrt{D/d_n} \quad (\text{II-5})$$

#### II.4.1.2 Vitesse d'emboutissage :

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Les transformations que subisse le métal à froid entraînent un écrouissage de celui-ci dépendant de cette vitesse.

✓ Une vitesse trop faible tend à générer un écrouissage trop important sur le métal pour le rendre 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 [9]. Les vitesses qui suivent peuvent être adoptées :

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

### II.4.1.3 Pression du serre-flan :

La suppression des plis est l'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  $d < 0,95 D$  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'embouti ; soit :

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

$$Q = (\pi / 4) \left[ D^2 - (d + 2r_m)^2 \right] p \quad (\text{II-6})$$

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 [9].

### II.4.1.4 Effort d'emboutissage :

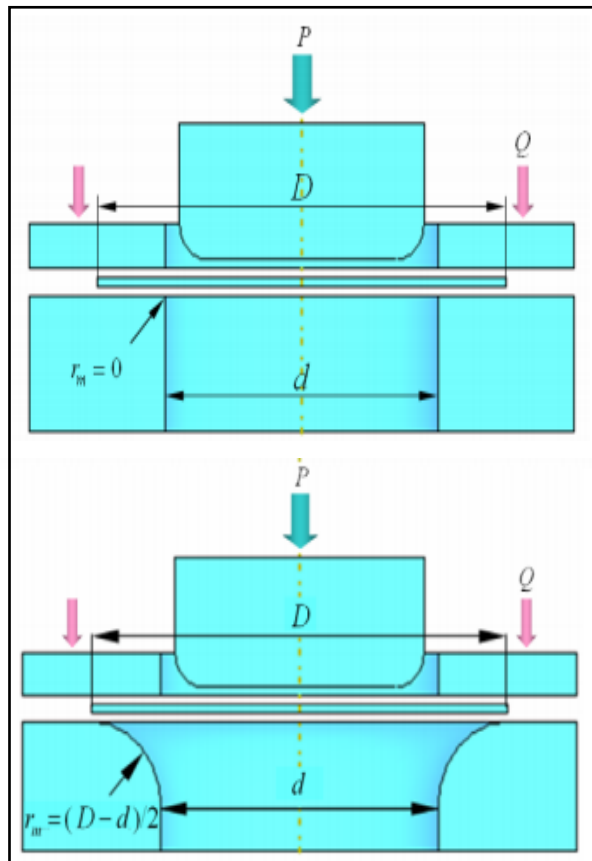
L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend tout d'abord des diamètres de l'embouti et du flan primitif, de l'épaisseur et de la qualité de la tôle. Il dépend également de la pression du serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de l'arrondi de la matrice, du jeu entre le poinçon et la matrice, et de la lubrification [9].

Comme il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs dans la détermination de l'effort du poinçon, on emploie la formule simplifiée qui suit :

$$p = \pi \cdot d \cdot h \cdot k \cdot R_m \quad (\text{II-7})$$

## II.4.2 Rayon de la matrice :

Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la répartition des forces.



**Figure II.6 :** Variation de l'arrondi sur la matrice [9].

En effet, on comprend parfaitement que dans les deux cas extrêmes (figure II.6), l'emboutissage n'est pas viable ; on observera pour :

- ✓  $r_m = 0$ , un déchirement du flan ;
- ✓ et pour  $r_m = (D - d) / 2$ , la formation de plis.

Afin de déterminer le rayon efficace, on utilise la relation de Kaczmarek [9] concernant la première passe :

- Pour l'acier doux :  $r_m = 0,8[(D - d)h]^{1/2}$  (II-8)

- Pour l'aluminium :  $r_m = 0,9[(D - d)h]^{1/2}$  (II-9)

Pour la deuxième passe [7], on a :

$$r_m = (d_1 - d_2) / 2 \quad \text{(II-10)}$$

### II.4.3 Paramètres liés au poinçon :

#### II.4.3.1 Rayon du poinçon :

Le rayon du poinçon ne doit pas être trop faible pour éviter le décalottage 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 exige un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation [7].

#### II.4.3.2 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 frottement 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 [9].

#### II.4.4 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 [9].

- Flan pratique : Il ne peut se 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 le détourage (figure II.7), on détermine le diamètre du flan par :

$$d^2 = 4 \cdot S / \pi \quad (\text{II-11})$$

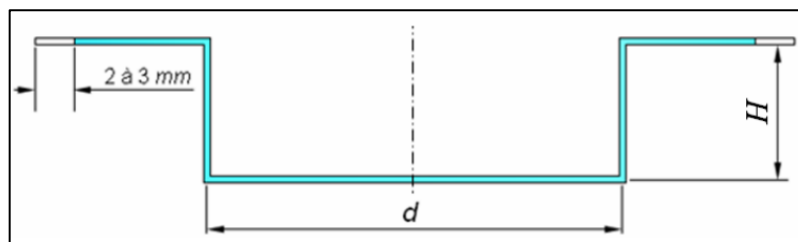


Figure II.7 : Ajout pour le détourage [9].

#### II.4.5 Paramètres de réglage

Une fois l'outillage mis au point, le réglage de l'opération d'emboutissage repose sur le choix d'un petit nombre de paramètres [4].

✓ **Cadence** : Affectant directement le régime thermique de l'outil, la réduction de cadence permet d'améliorer la qualité des pièces difficiles ; elle se situe habituellement entre 10 et 20 coups/min. Soulignons que, dans le cas des presses mécaniques, la réduction de cadence ne change pas le cycle d'emboutissage, ce dernier étant déterminé par les éléments

cinématiques de la presse. Il ne peut donc pas en résulter de changement dans les vitesses de déformation ou dans les temps de maintien des efforts de formage.

✓ **Lubrification** : En emboutissage comme dans tous les procédés de formage, la lubrification a une incidence directe sur les écoulements de métal ; en particulier, en facilitant le glissement du métal sur les outils, elle augmente le déplacement du métal et donc l'usure des outils. Une lubrification différentielle selon les zones de la pièce serait la bienvenue pour le pilotage des écoulements, mais sa mise en place n'est pas évidente à réaliser. Dans le domaine de la lubrification, les règles sont en fait très variables d'un atelier à l'autre pour les raisons suivantes :

- la présence d'huile de protection anticorrosion sur les tôles d'acier doux pose un problème de compatibilité avec les huiles d'emboutissage. On adopte parfois la solution alternative du dégraissage des flans avant rehuilage pour emboutissage ;
- la stabilité du processus d'emboutissage impose une bonne répétabilité des conditions de lubrification, en particulier du grammage d'huile déposée ;
- les pièces devant être peintes ultérieurement, le dégraissage après emboutissage limite le choix du lubrifiant. Compte tenu du coût du lubrifiant et des nuisances engendrées par la manutention de pièces grasses (salissure des sols), de plus en plus d'ateliers s'abstiennent de rehuiler et se contentent d'utiliser l'huile de protection comme lubrifiant d'emboutissage.

✓ **Pression de serre-flan** : C'est en fait le principal paramètre sur lequel l'opérateur agit pour assurer la qualité des pièces. Plus elle est élevée, plus les modes de déformation se déplacent vers l'expansion, mais aussi plus les amincissements et les risques de rupture augmentent. On désigne habituellement par latitude de réglage l'amplitude de variation de pression de serre-flan disponible entre la disparition des plis et l'apparition de la striction. Classiquement uniforme sur toute la portée du serre-flan et constante tout au long de l'emboutissage, la tendance actuelle serait plutôt de s'orienter vers son pilotage pour moduler les pressions selon les zones et le stade d'emboutissage.

✓ **Joncs de retenue** : Ce sont des artifices ajoutés dans la zone serre-flan dans le but de freiner les glissements du métal dans les régions où ils sont particulièrement importants. Ces dispositifs viennent en complément des formes déjà prévues dans cette optique, à savoir : les gradins d'entrée de la matrice (figure II.8). Fonctionnant selon le même principe de pliage-dépliage, leur sévérité peut être adaptée aux exigences locales par diminution de leurs rayons et/ou augmentation de leur hauteur. Des joncs multiples (généralement deux, voire trois) disposés en rangées parallèles peuvent également être utilisés pour accroître l'effet de frein dans les zones fortement sollicitées.

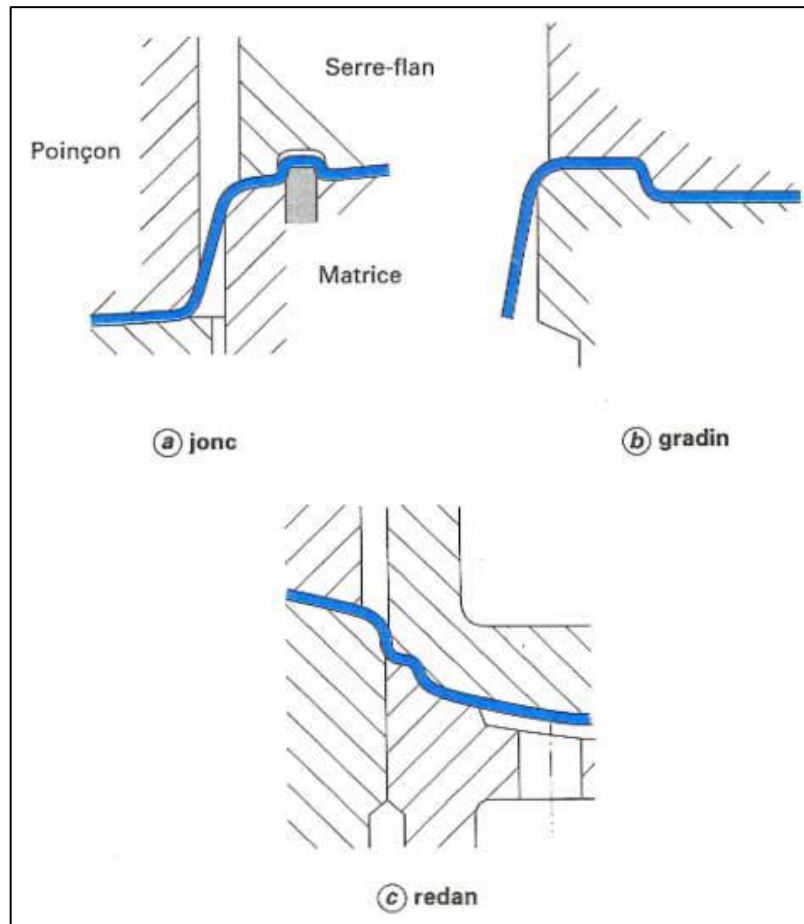


Figure II.8 : Jonc de retenue, gradin ou redan [4].

✓ **Forme du flan :** La géométrie du flan est le paramètre le plus influent sur les écoulements du métal. Son choix est cependant fortement restreint par les considérations de mise matière et de coût d'outillages de découpe. C'est pourquoi les flans sont le plus souvent de forme rectangulaire ou trapézoïdale correspondant au coût minimal de réalisation et d'entretien des lames de découpe.



## Chapitre III

# Approche numérique pour l'emboutissage cible



### III.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'intérêt des approches numériques pour le procédé d'emboutissage. Puis, nous allons évoquer les différents niveaux d'investigation pour la mise au point d'un embouti. Aussi, l'approche numérique adoptée sera relatée ainsi que les résultats de simulation et leur interprétation.

### III.2 INTÉRÊT DES APPROCHES NUMÉRIQUES :

La conception et la mise au point d'une pièce emboutie et de l'outillage d'emboutissage correspondant représentent un travail très important d'épure et de définition géométrique pour la réalisation duquel l'assistance de logiciels de dessin est particulièrement bien adaptée. Les opérations de balancement d'outil, de recherche de contre-dépouilles et de construction de surface du serre-flan s'en trouvent ainsi facilitées et les temps de conception correspondants fortement réduits [4].

En complément de la DAO (Dessin Assisté par Ordinateur), la simulation numérique de l'emboutissage présente de multiples intérêts :

- en remplaçant des expérimentations physiques par des essais numériques, elle est utilisable très en amont dans le processus de conception et peut ainsi aider à effectuer les choix de géométrie de pièce les mieux adaptés à la mise en forme par emboutissage, induisant de ce fait des gains de délai de mise au point et des économies d'outillages d'essai ;

- en permettant, de par sa versatilité, de comparer différentes configurations et donc d'optimiser la solution, elle conduit à une meilleure stabilité de la production, à des économies de matière (mise au mille), à une meilleure tenue des outils et à un accroissement de la qualité des pièces ;

- en décrivant l'évolution tout au long du processus de phénomènes inobservables pratiquement, elle permet de prévoir les défauts et surtout de comprendre leurs mécanismes de formation, suggérant ainsi des solutions pour leur prévention ;

- en fournissant une évaluation des efforts de formage, contraintes, pressions et températures locales, elle peut être un auxiliaire précieux pour la conception des outils et le choix des machines (dimensionnement, choix des traitements thermiques ou de surface) ;

- de par les résultats quantitatifs qu'elle fournit, elle permet d'évaluer le poids de chaque paramètre et donc de renseigner sur le ou les paramètres à modifier en priorité pour un meilleur compromis coût/résultat ;

- en estimant les caractéristiques de type contraintes résiduelles, épaisseurs résiduelles,

elle peut en outre servir à l'optimisation de la définition de la pièce par rapport aux conditions de service.

### III.3 DIFFÉRENTS NIVEAUX D'INVESTIGATION :

La mise au point d'un embouti nécessite l'obtention d'informations relatives à différents niveaux d'investigation [4] ; on en distingue principalement quatre :

✓ **Approches géométriques :** Il s'agit en fait d'investigations qui relèvent davantage de la CAO que de la simulation proprement dite. C'est le cas par exemple des opérations de recherche de contre-dépouilles lors du balancement de la pièce ou d'identification des zones d'attaque du poinçon en début d'emboutissage.

✓ **Approches 2D :** Ces approches bidimensionnelles permettent d'obtenir rapidement des informations raisonnables en travaillant sur des sections de la pièce. Cette approche, qui se justifie principalement sur des pièces longues à section peu évolutive ou sur des pièces à géométrie proche de la symétrie de révolution, permet de déterminer en particulier les rayons d'entrée matrice.

✓ **Approches inverses :** Partant de la pièce finie, cette approche permet d'estimer les épaisseurs résiduelles attendues localement sans avoir à prendre en compte les surfaces annexes qui seront ajoutées à sa géométrie pour la réaliser. Reposant sur des techniques de projection et de minimisation énergétique, ces logiciels simplifiés peuvent soit se limiter à une approche strictement géométrique, soit au contraire prendre en compte des éléments de plasticité et de frottement, affinant ainsi les informations locales obtenues dans les zones à forts gradients de déformation.

✓ **Approches 3D :** Ces approches tridimensionnelles assurent une simulation complète du processus d'emboutissage. Les logiciels correspondants reposent sur des modèles de type coques minces en grandes déformations élastoplastiques prenant en compte la plasticité anisotrope du matériau et les interactions pièce/outillage. Malgré leur degré de sophistication, ces logiciels ne répondent pas à toutes les questions que se pose le préparateur en emboutissage. En particulier, la prévision des retours élastiques s'avère délicate en raison même du choix des éléments coques pour la description du modèle qui ne donnent pas une description suffisamment fine des gradients de contraintes dans l'épaisseur de la tôle.

Pour la présente étude, nous utilisons une approche 3D dans un objectif de répondre au souci de la société Stainum qui éprouve des difficultés dans le procédé d'emboutissage.

### III.4 APPROCHE NUMÉRIQUE POUR L'EMBOUTISSAGE CIBLE :

#### III.4.1. Défauts de l'embouti cible :

L'embouti cible est une marmite, fabriquée entre autres à partir d'un flan en acier inoxydable, par l'entreprise Stainum sise dans la zone industrielle d'El-Kerma de la Wilaya d'Oran. Le produit embouti final est représenté par la figure qui suit.



Figure III.1 : Produit embouti cible.

Ce dernier produit peut être fabriqué par la société Stainum à partir de flans en aciers inoxydables 201, 304 et 304L (selon la norme AISI) comme le montre la figure suivante :

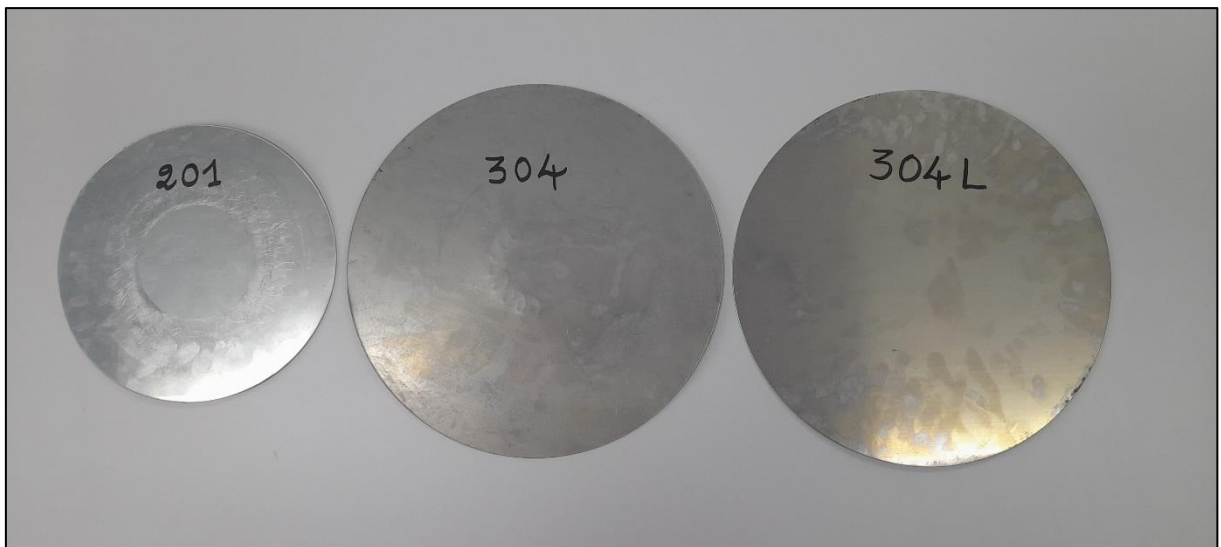


Figure III.2 : Flans bruts.

Selon l'embouti, ces flans peuvent avoir différents diamètres et différentes épaisseurs. Durant l'emboutissage du produit cible, la société Stainum a constaté que l'utilisation des aciers inoxydables 201 et 304 conduisent à des rebuts pouvant affecter à 50 % le taux de production.

À noter que durant le procédé d'emboutissage qui se fasse en deux passes, l'acier inoxydable 201 doit aussi subir des traitements thermiques pour réduire le rebut ; chose qui présente un effet néfaste pour l'huile d'emboutissage qui devient dangereuse en matière d'environnement. Par contre, le même produit embouti à base de l'acier inoxydable 304L offre un taux de production satisfaisant et sans recours aux traitements thermiques. Les défauts rencontrés durant l'emboutissage sont reportés sur la figure qui suit.



**Figure III.3 :** Exemple de défauts de l'embouti cible.

C'est ainsi que nous souhaitons contribuer, à travers cette modeste étude, à apporter des solutions basées sur une approche numérique au profit de la société Stainum.

### **III.4.2. Approche numérique :**

Pour satisfaire les besoins de l'industrie (et surtout l'industrie automobile) en simulation numérique de l'emboutissage de nombreux logiciels ont été développés et mis en service ; parmi ces logiciels, on peut citer [16] :

- ISOPUNCH (Société ISOFORM SOLLAC)
- SIMEM2 (SIMTECH)
- ABAQUS (ABAQUS software)
- LS-DYNA-3D (DYNALYS)
- FORGE2 (TRANSVALOR)
- OPTRIS (MATRA DATA VISION)
- PAM-STAMP (ESI)
- RADIOSS (MECALOG).



Parmi ces logiciels, nous avons choisi a priori le software Abaqus 2017 ; ce dernier est basé sur la Méthode des Eléments Finis (MEF). Son interface d'utilisation est organisée sous forme de différents modules ; à savoir :

➤ **Le module « PART »** : permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème traité, soit en les dessinant dans Abaqus, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

➤ **Le module « PROPERTY »** : permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

➤ **Le module « ASSEMBLY »** : assemble les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.

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

➤ **Le module « INTERACTION »** : grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies.

➤ **Le module « LOAD »** : permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants du module STEP.

➤ **Le module « MESH »** : contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

➤ **Le module « JOB »** : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser ce module pour réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

Nous allons présenter par la suite l'utilisation de chaque module pour aboutir aux résultats de simulation. À noter que le module « PROPERTY » permet d'introduire les caractéristiques des éléments qui constituent l'assemblage. Rappelons que le procédé d'emboutissage fait appel à trois éléments géométriques qui sont : le flan, la matrice et le poinçon.

Le flan qui est le produit embouti sera considéré comme étant un matériau déformable ; par contre, la matrice et le poinçon seront pris comme étant des corps rigides. Ainsi, la loi de comportement du matériau constituant le flan doit être introduite.

### III.4.3. Loi de comportement du flan :

Les lois de comportement sont des lois empiriques qui visent à modéliser le comportement d'un matériau lors de sa déformation. Ces lois peuvent être classées en deux catégories [17] :

- lois de comportement phénoménologiques basées sur des relations mathématiques empiriques sans tenir compte de l'origine de certains mécanismes physiques ;
- lois de comportement physiques qui reposent sur l'introduction de paramètres physiques comme la taille de grain, la densité de dislocations, etc.

Dans la présente étude, nous allons nous contenter à la loi de comportement phénoménologique de Johnson-Cook. Le plus gros avantage de cette loi est sa simplicité car elle présente la particularité de pouvoir identifier séparément les termes en déformation, vitesse de déformation et température ; cette loi est exprimée par :

$$\sigma = \underbrace{[A + B \varepsilon^n]}_1 \underbrace{\left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]}_2 \underbrace{\left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{\text{fus}} - T_0} \right)^m \right]}_3 \quad (\text{III-1})$$

**Le terme 1** traduit la sensibilité de la contrainte à la déformation ainsi que l'effet du phénomène d'érouissage à travers la puissance.

La dépendance à la vitesse de déformation, donc le caractère visqueux, est soulignée par le **terme 2**.

Enfin, la dépendance à la température se retrouve dans le **terme 3** qui traduit l'adoucissement thermique, c'est-à-dire l'influence de la température sur les propriétés structurales de la matière et donc sur son écoulement.

Les matériaux obéissant à loi de Johnson-Cook sont :

- les aciers ;
- les alliages de titane, et d'aluminium.

Les paramètres de la loi de Johnson-Cook pour différents métaux sont identifiés lors d'expériences menées sur des barres de Hopkinson.

À noter que la loi de comportement de Johnson-Cook a été adoptée pour les aciers inoxydables 304 et 304L. Pour l'acier inoxydable 201, nous n'avons pas pu trouver une loi de comportement de type Johnson-Cook ; à cet effet, nous avons adopté une loi de comportement de type puissance exprimée par :

$$\sigma = \bar{k} \varepsilon^n \quad (\text{III-2})$$

### III.4.4. Simulation numérique :

#### III.4.4.1. Création des géométries des éléments :

La figure qui suit relate la création de la géométrie du flan de diamètre 400 mm et d'épaisseur 0,8 mm.

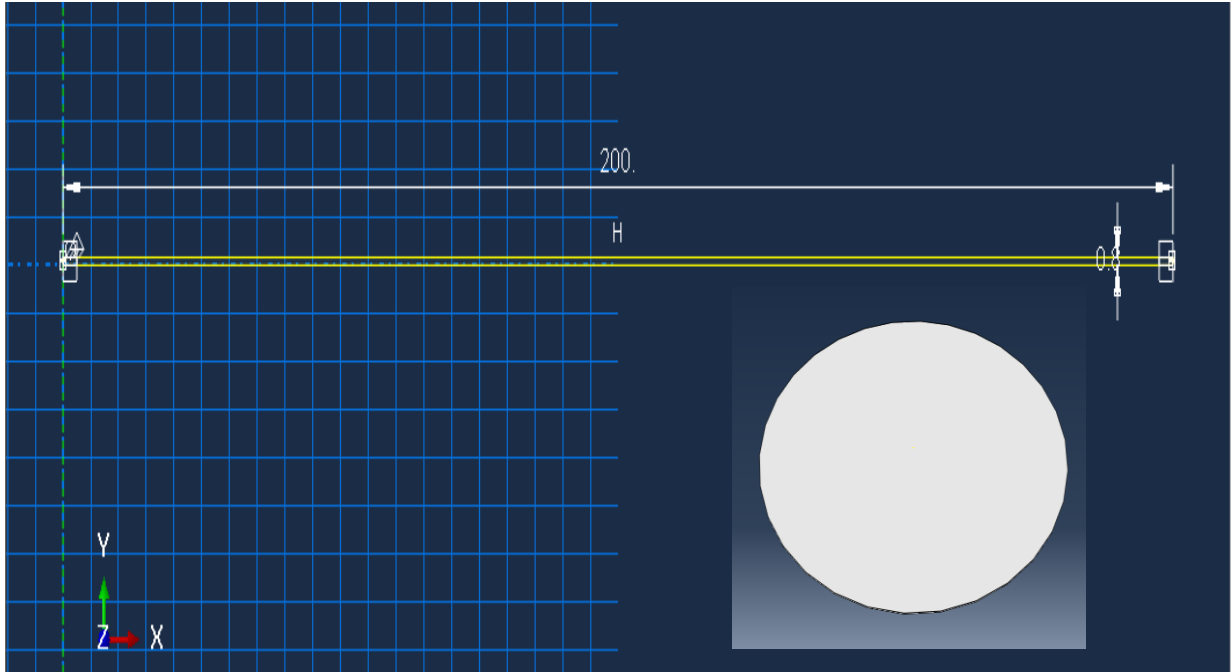


Figure III.4 : Géométrie du flan.

À noter que le flan a été créé comme étant un corps déformable.

Nous allons maintenant représenter les éléments géométriques de la matrice.

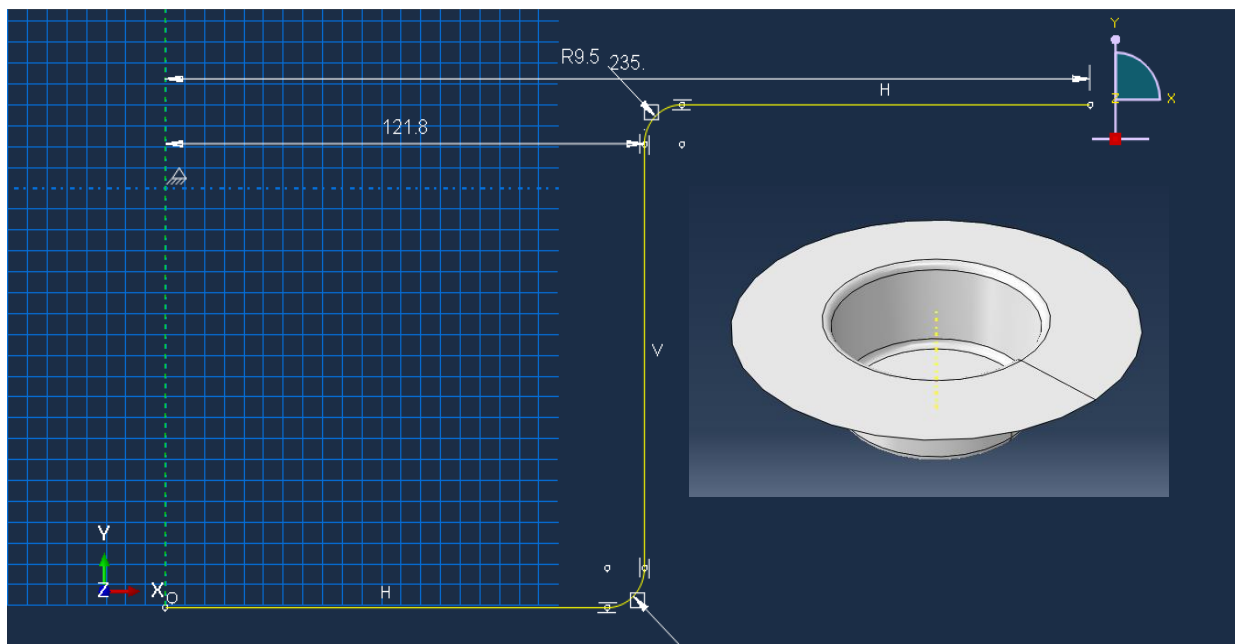


Figure III.5 : Géométrie de la matrice.

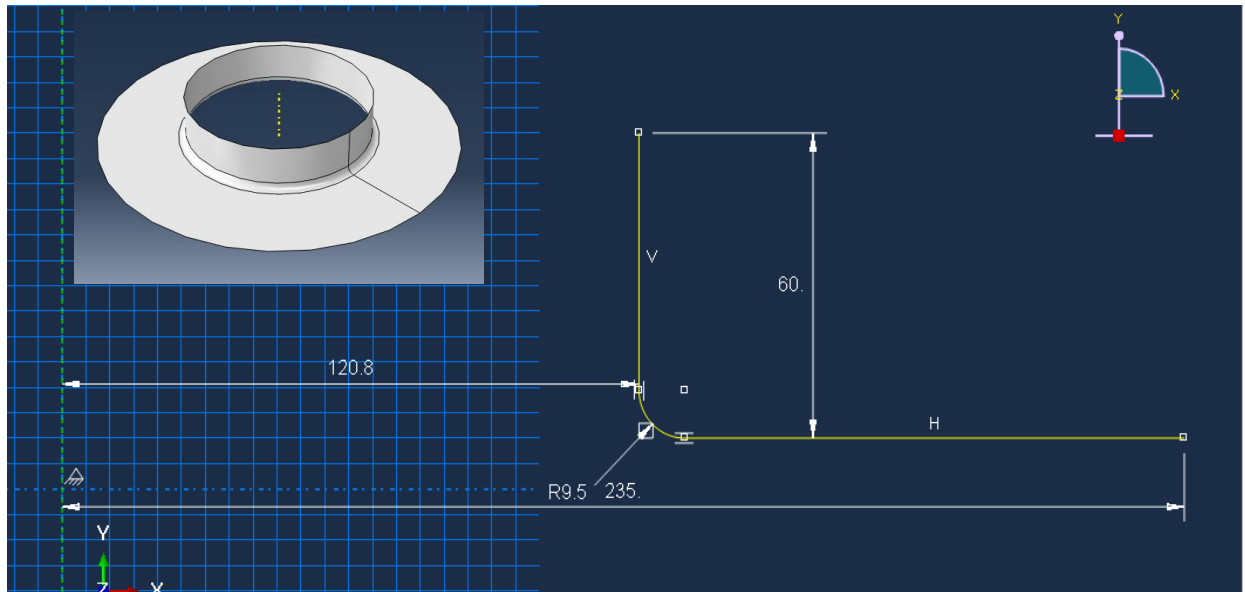


Figure III.6 : Géométrie du serre-flan.

La matrice et la serre-flan (partie intégrante) sont créés comme étant des corps rigides.

La figure qui suit relate la création de la géométrie du poinçon.

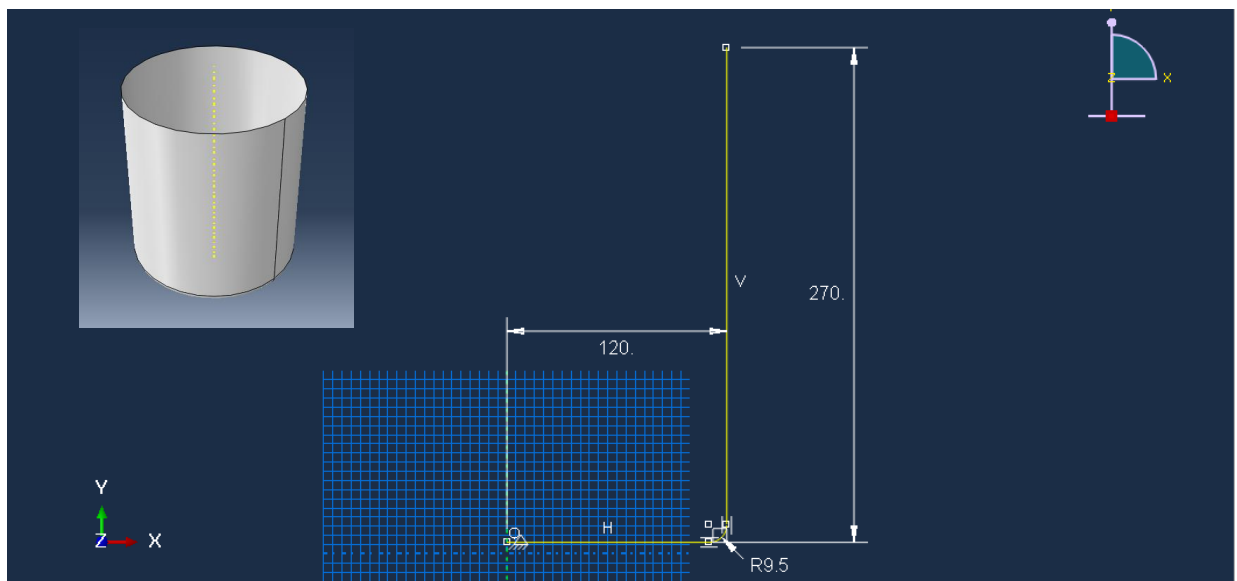


Figure III.7 : Géométrie du poinçon.

#### III.4.4.2. Paramètres de comportement du flan :

A priori, la matrice (y compris le serre-flan) et le poinçon sont assimilés à des corps rigides discrets. Nous introduisons sur Abaqus uniquement les propriétés du matériau qui constitue le flan comme étant un corps déformable plastique ; son modèle constitutif est celui de Johnson-Cook. La figure qui suit montre, par exemple, l'introduction des paramètres de ce modèle dans Abaqus, et ce pour l'acier inoxydable 304.

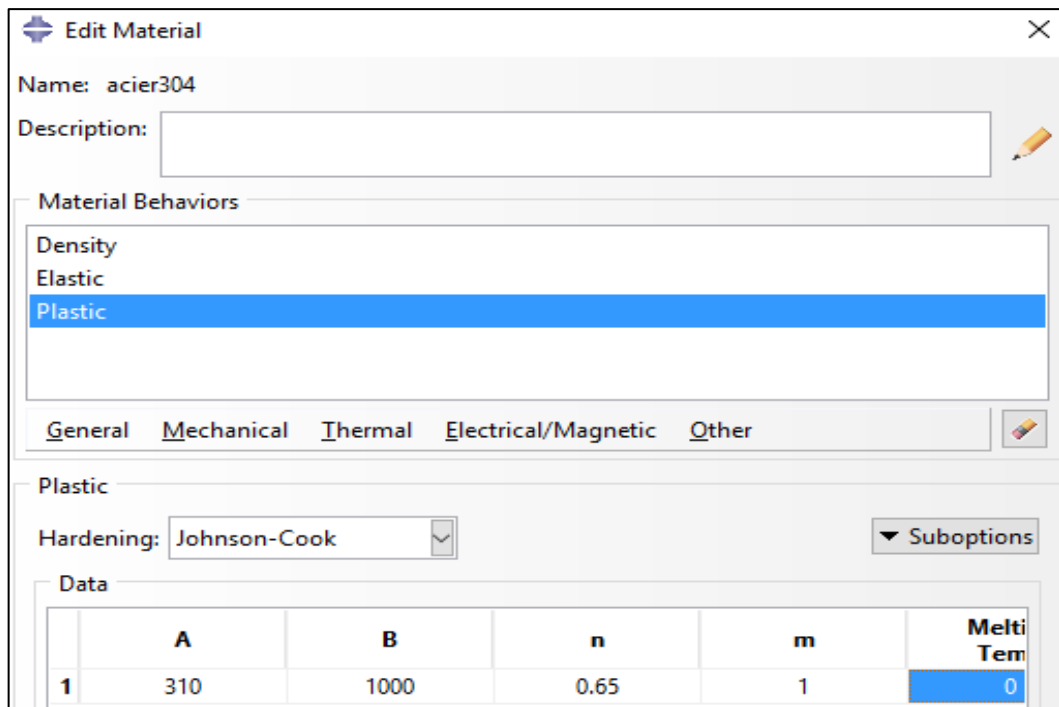


Figure III.8 : Propriétés du matériau de flan (Acier inoxydable 304).

Les paramètres de comportement pour les aciers inoxydables 201, 304 et 304L sont reportés dans les tableaux qui suivent :

Température	$\bar{k}$ (MPa)	n
100 °C	1528	0,529

Tableau III.1 : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 201) [18].

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	$\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )
310	1000	0,65	1,00	0,07	1,00

Tableau III.2 : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 304) [19].

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	$\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )
344,7	310,3	0,30	1,03	0,24	1,00

Tableau III.3 : Paramètres de comportement (Acier inoxydable 304L) [20].

### III.4.4.3. Maillage de l'assemblage flan-matrice-poinçon :

Le progiciel Abaqus propose le type d'éléments finis (triangulaire, quadrilatéral, ...) ; Pour notre cas, nous avons choisi a priori des éléments quadrilatéraux pour des raisons de simplicité.

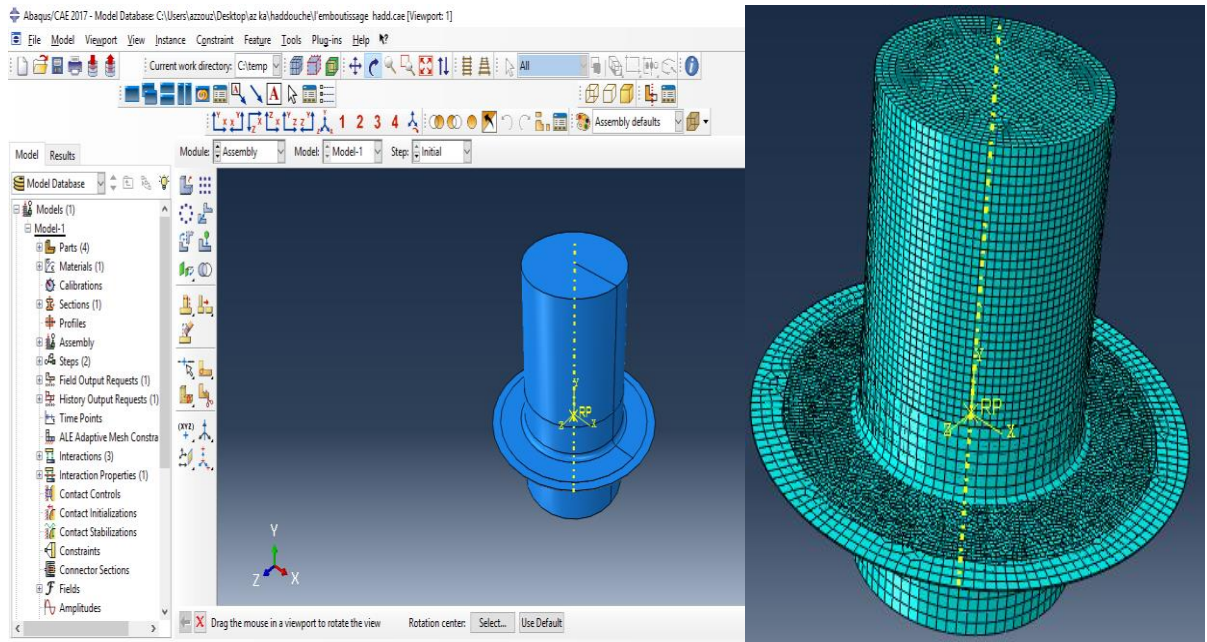


Figure III.9 : Maillage de l'assemblage flan-matrice-poinçon.

#### III.4.4.4. Étapes de simulation :

Dans le module « STEP », on définit toutes les étapes de la simulation ; par exemple, le moment (temps) à partir duquel une force ou une vitesse est appliquée et jusqu'à quand. Pour notre travail, nous avons choisi une simulation en mode dynamique car le poinçon se déplace à une certaine vitesse pour pouvoir déformer le flan.

La figure qui suit montre, d'une part, le positionnement du flan sur la matrice et sous le serre-flan, et, d'autre part, l'obtention de l'embouti suite au déplacement du poinçon.



Figure III.10 : Positionnement du flan pour emboutissage.

À la fin du processus, la pièce sort à une température de 60 °C à 70 °C due à la déformation plastique et au frottement. La vitesse de déplacement du poinçon a été calculée suite à la mesure du temps balayé par le passage du poinçon sur une distance de 110 mm et sous une pression de 10 MPa ; soit :

1. 4,5 s
2. 4,2 s
3. 4,1 s
4. 4,2 s
5. 3,9 s



La vitesse du poinçon est :  $V_p = \frac{\text{Distance parcourue}}{\text{Temps moyen}} = \frac{110}{4,18} = 26,316 \text{ mm/s}$ .

Donc, le temps de simulation sera choisi aux alentours de 4 s avec une vitesse de déplacement vertical du poinçon égale à 26,316 mm/s.

#### III.4.4.5. Définition des interactions :

Dans le module « INTERACTION », il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties ou régions du modèle d'assemblage qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Pour notre assemblage, l'interaction est de type contact surface à surface.

La figure qui suit montre le choix des interactions sur Abaqus.

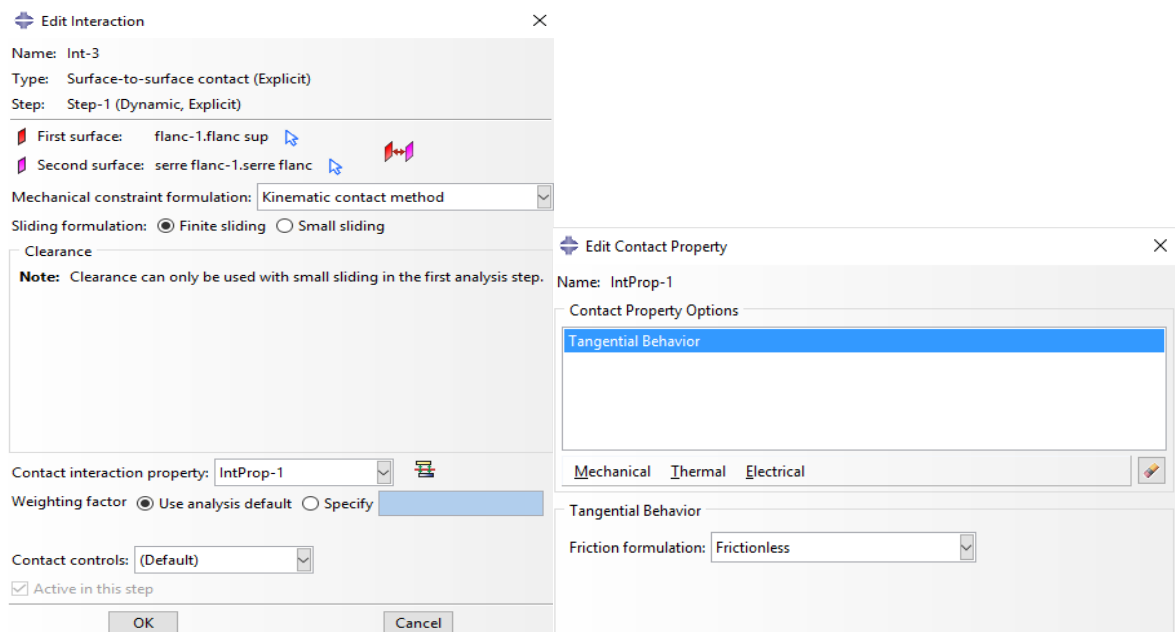


Figure III.11 : Définition des interactions.

#### III.4.4.6. Chargement et conditions aux limites :

Le module « LOAD » permet de spécifier tous les chargements et/ou les conditions aux limites. Pour notre simulation, la matrice sera considérée comme étant un élément présentant



un encastrement, et le poinçon sera animé d'un mouvement de translation. Les figures qui suivent illustrent ces situations.

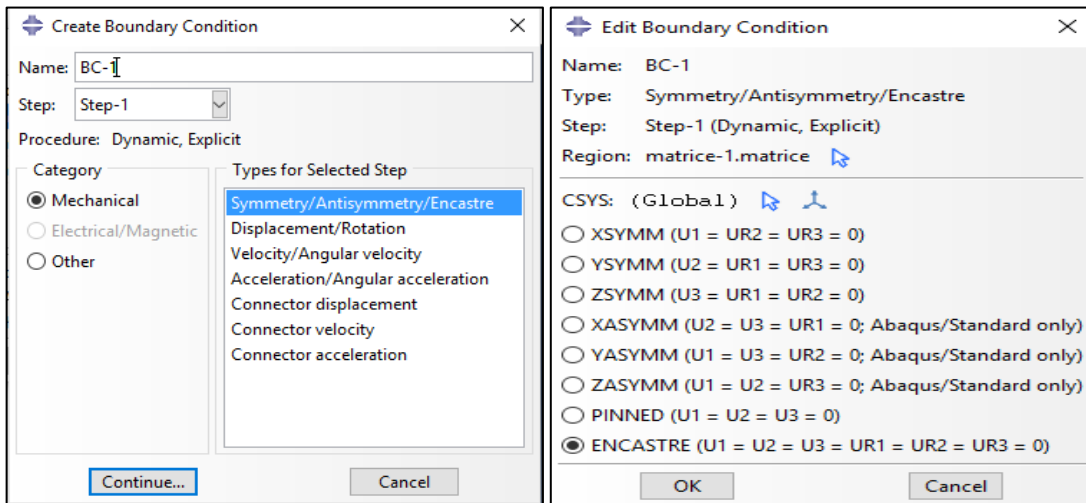


Figure III.12 : Conditions aux limites pour la matrice.

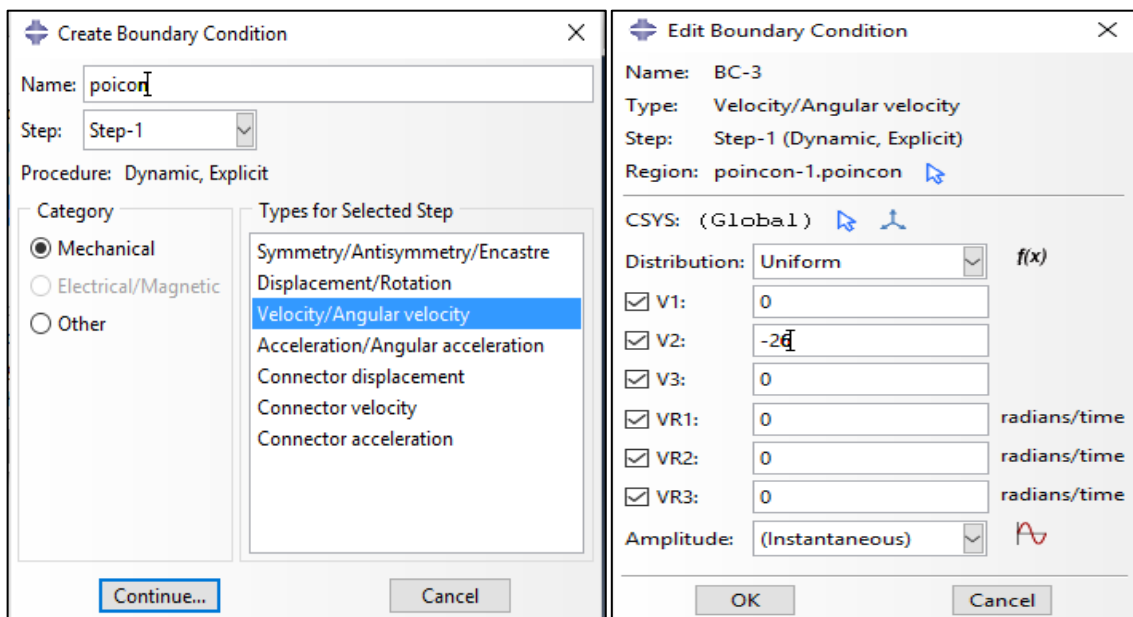


Figure III.13 : Conditions aux limites pour le poinçon.

**III.4.4.7. Lancement de la simulation :**

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module « JOB » pour soumettre la simulation. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

**III.4.4.8. Unités dans Abaqus :**

Abaqus n'indique pas les unités des grandeurs physiques ; c'est à l'utilisateur de faire un choix du système d'unités. Pour notre travail, nous avons choisi les unités qui suivent :



Distance	Temps	Masse	Masse volumique	Force	Contrainte
[mm]	[s]	Tonne [t]	[t.mm <sup>-3</sup> ]	[N]	[MPa]

Tableau III.4 : Choix des unités.

III.4.4.9. Résultats de simulation :

Rappelons que trois types d'acier ont été considérés pour l'embouti ; à savoir : les aciers inoxydables 201, 304 et 304L. Les figures qui suivent montrent respectivement les contraintes équivalentes de Von-Misès subis par le flan durant la simulation numérique d'un procédé d'emboutissage.

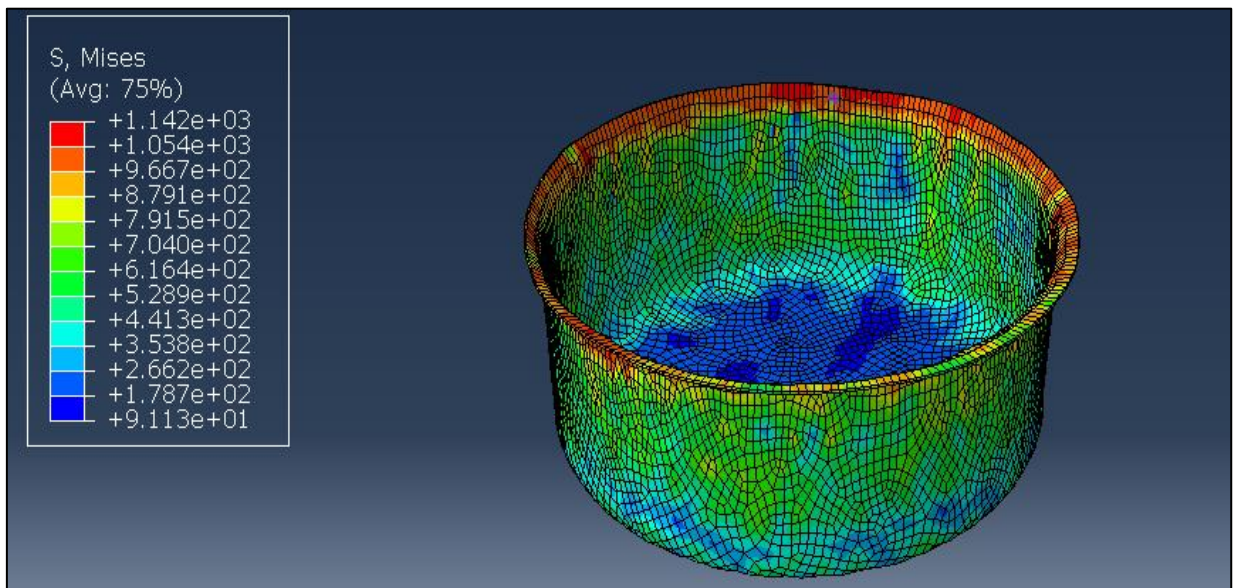


Figure III.14 : Contraintes de Von-Misès sur l'embouti en acier inoxydable 201.

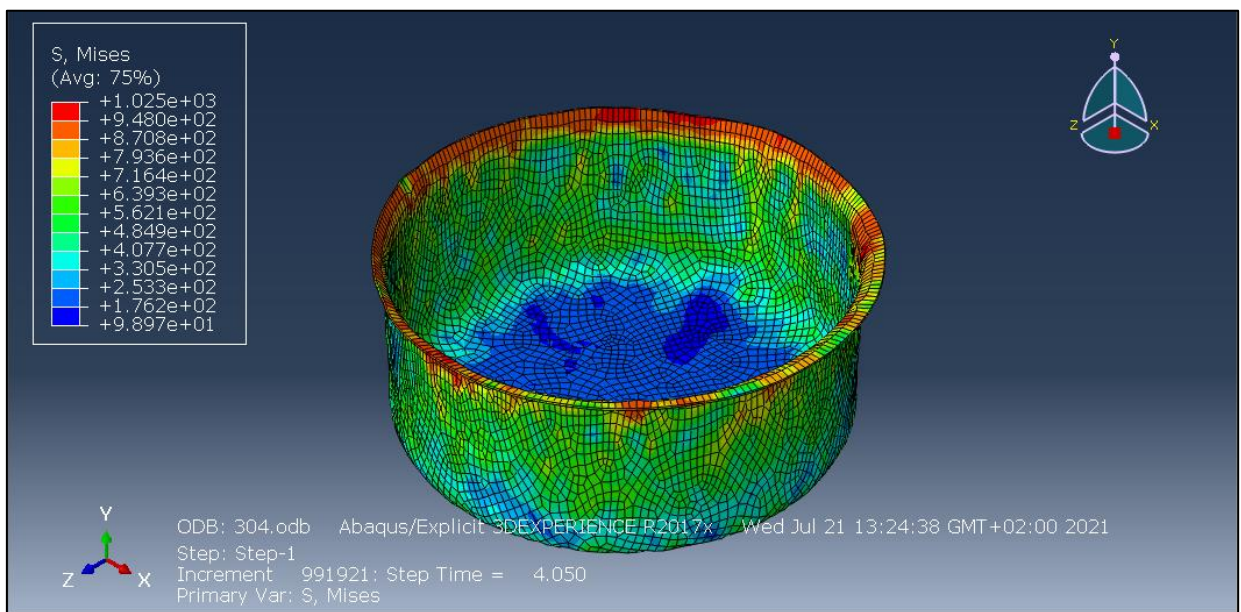
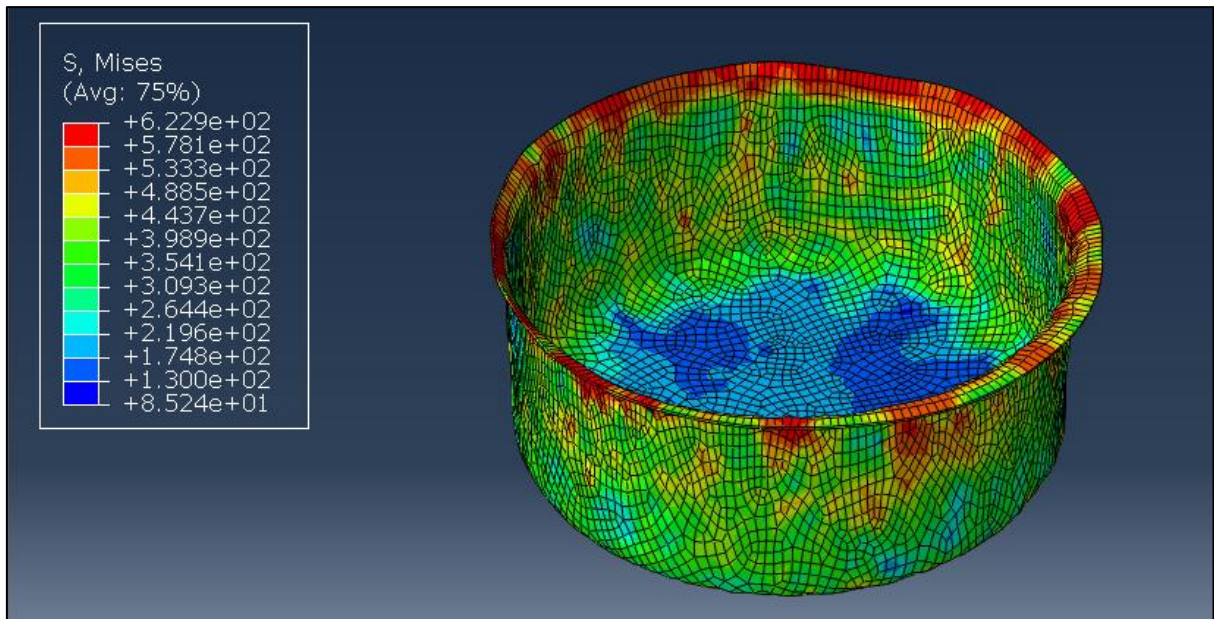


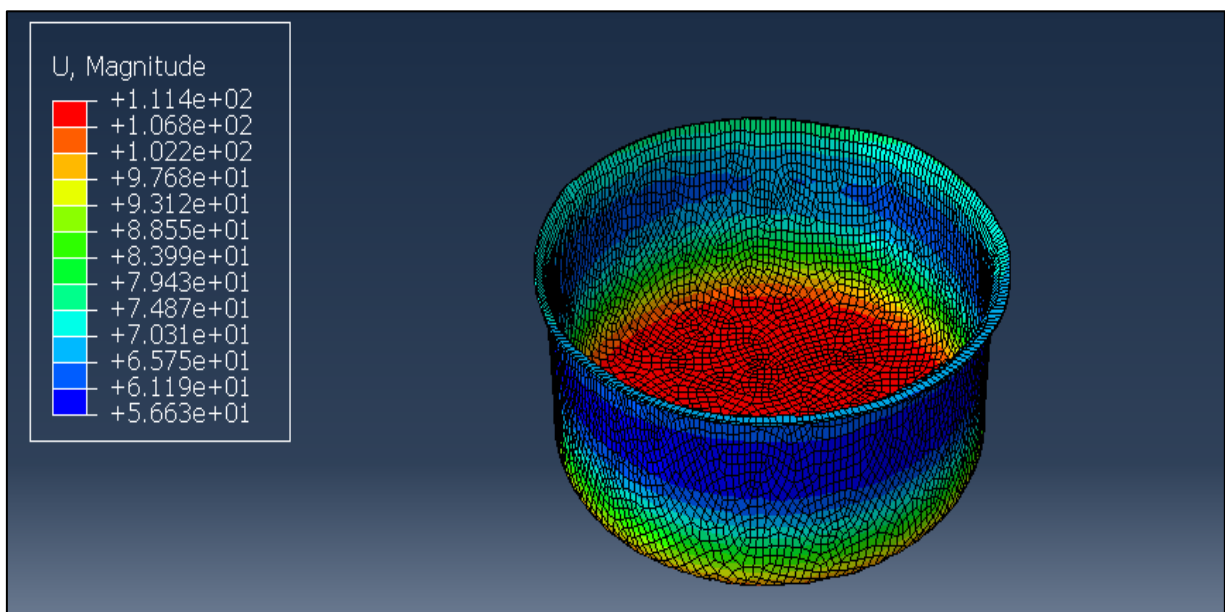
Figure III.15 : Contraintes de Von-Misès sur l'embouti en acier inoxydable 304.



**Figure III.16 :** Contraintes de Von-Mises sur l'embouti en acier inoxydable 304L.

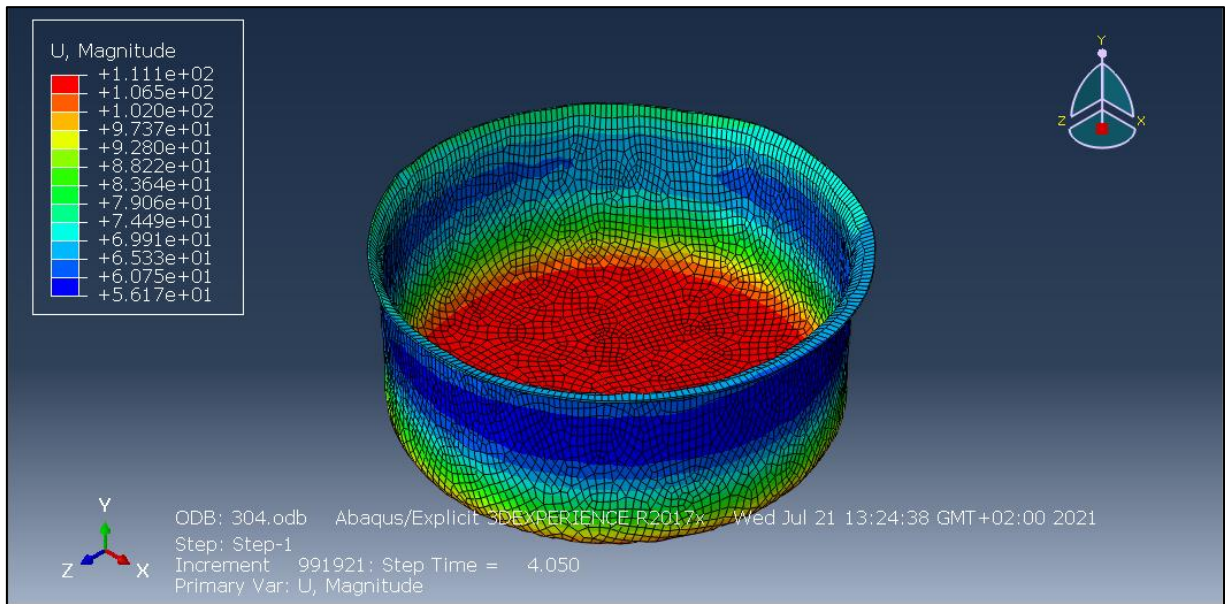
D'après les figures III.14, III.15 et III.16, l'embouti 304L se prête le mieux au procédé d'emboutissage car il présente des contraintes de Von-Mises les moins importantes. Pour les trois cas de simulation, les contraintes sont importantes au niveau de la partie initialement tenue par le serre-flan.

Les figures qui suivent montrent respectivement pour les aciers 201, 304 et 304L les déplacements subis par le flan durant la simulation numérique du procédé d'emboutissage.

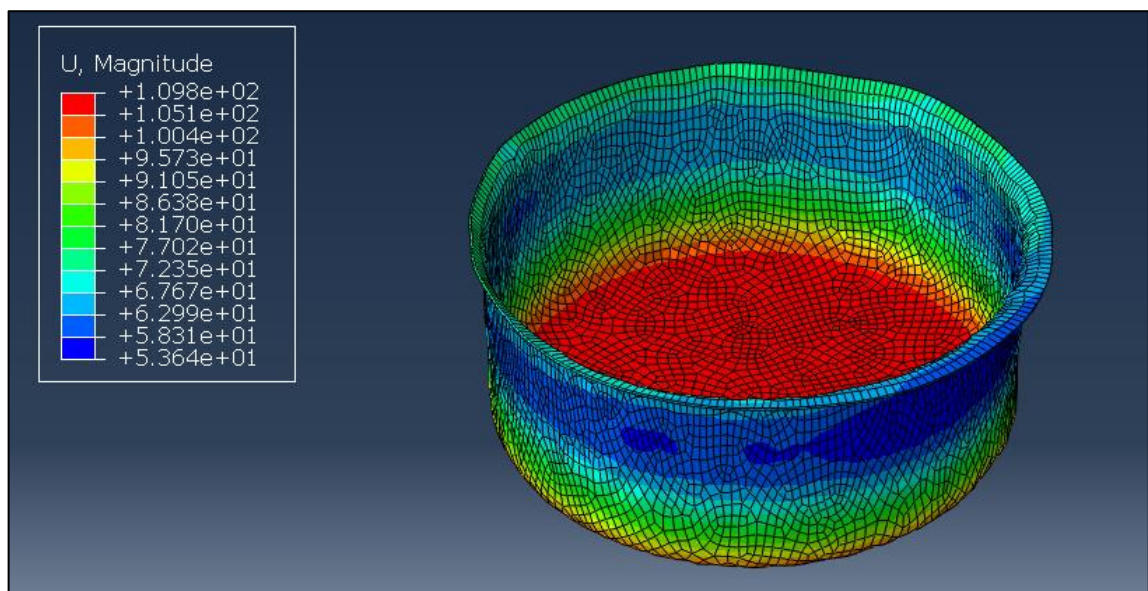


**Figure III.17 :** Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 201.





**Figure III.18 :** Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 304.



**Figure III.19 :** Déplacement subi par l'embouti en acier inoxydable 304L.

D'après les figures III.17, III.18 et III.19, les déplacements atteints en simulation numérique correspondent bien à la longueur ou la hauteur d'emboutissage mesurée et égale à 110 mm. Les déplacements présentent une valeur maximale au fond de l'embouti pour les trois cas.

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation numérique relatifs à l'effet de changement de la vitesse du poinçon, et ce pour les trois types d'aciers constituant le flan. Rappelons que la vitesse du poinçon a été prise initialement égale à 26,316 mm/s ; ainsi, nous allons considérer la moitié et le double de cette vitesse, soient respectivement des vitesses de 13,158 mm/s et de 52,632 mm/s.

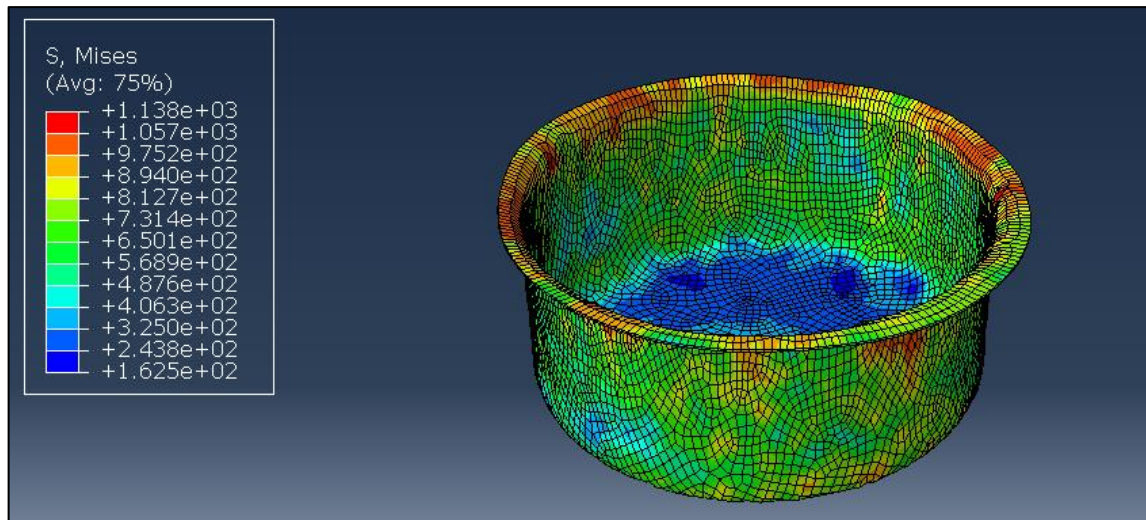


Figure III.20 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une vitesse de 13,158 mm/s.

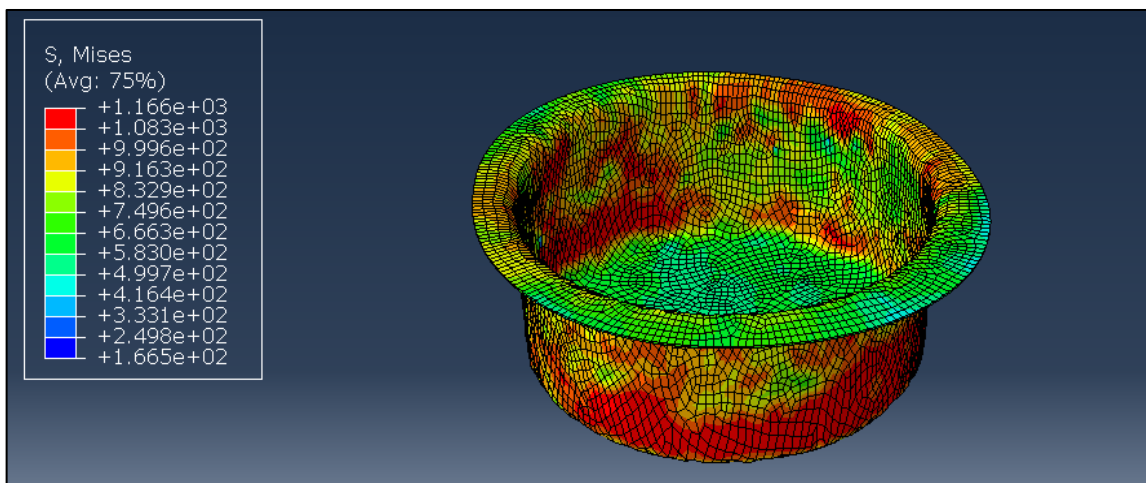


Figure III.21 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une vitesse de 52,632 mm/s.

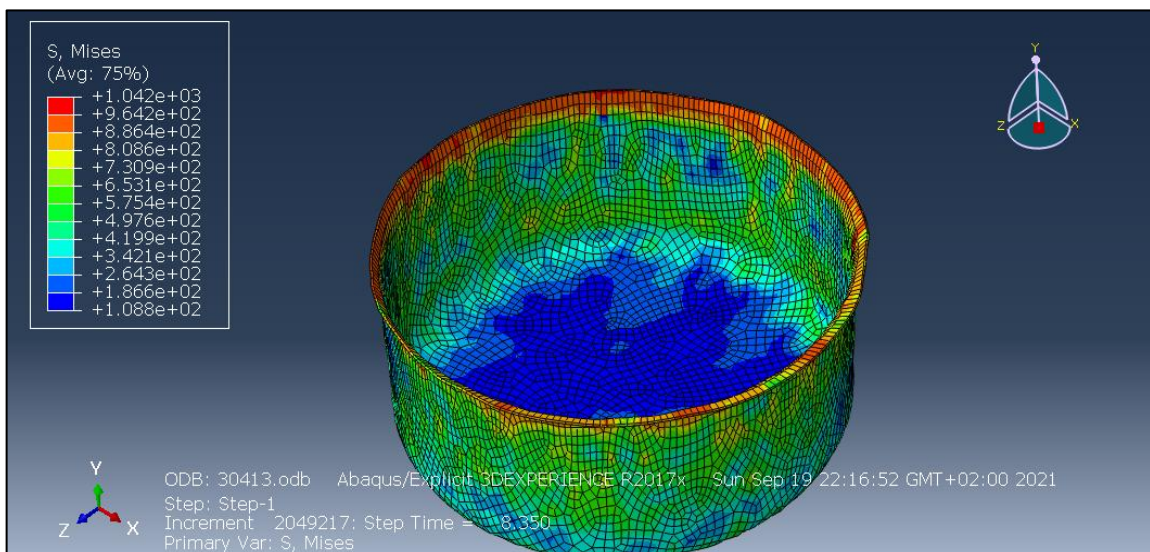
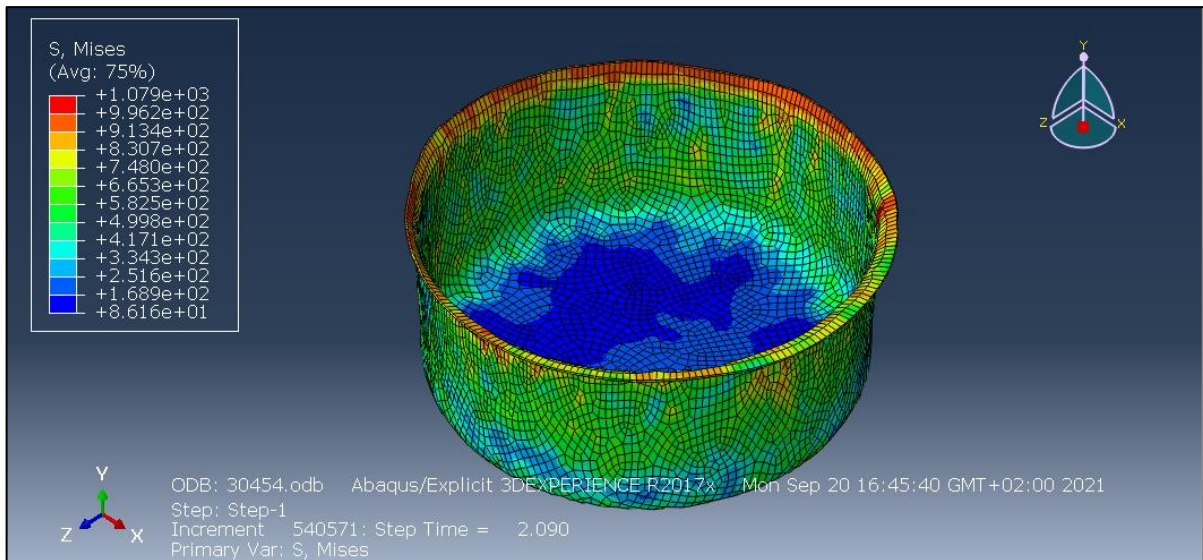
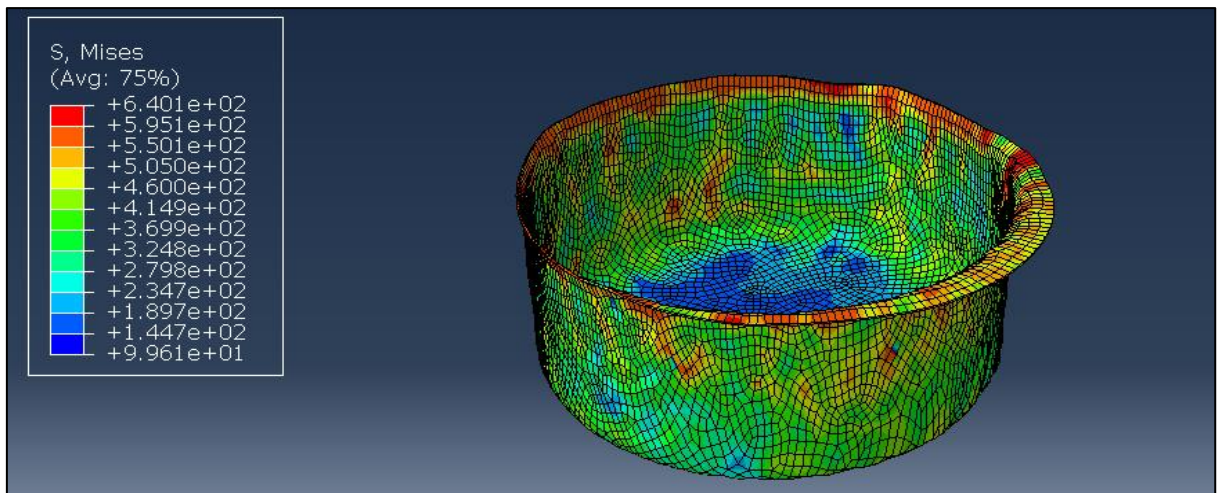


Figure III.22 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une vitesse de 13,158 mm/s.

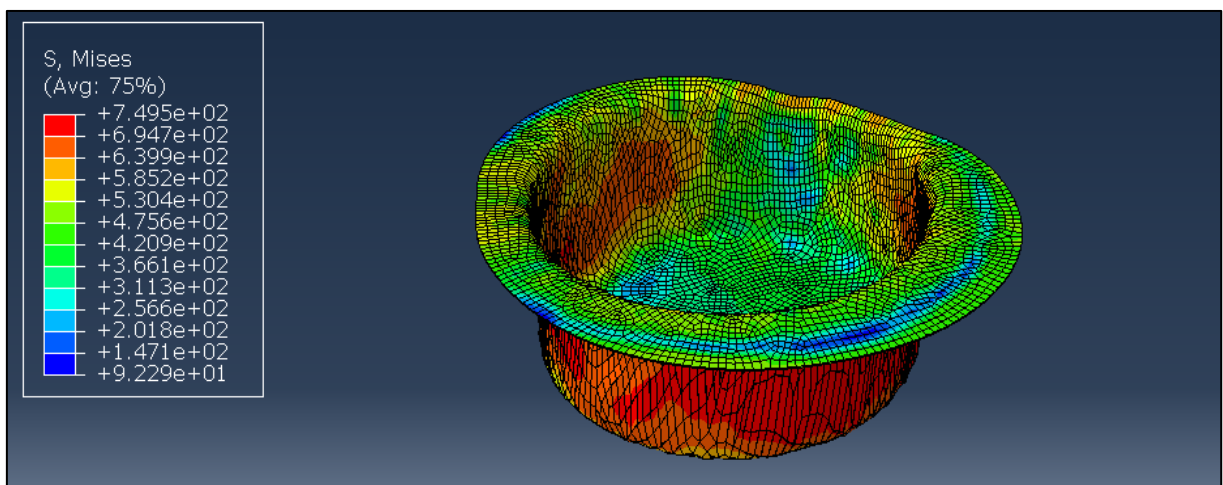




**Figure III.23 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une vitesse de 52,632 mm/s.

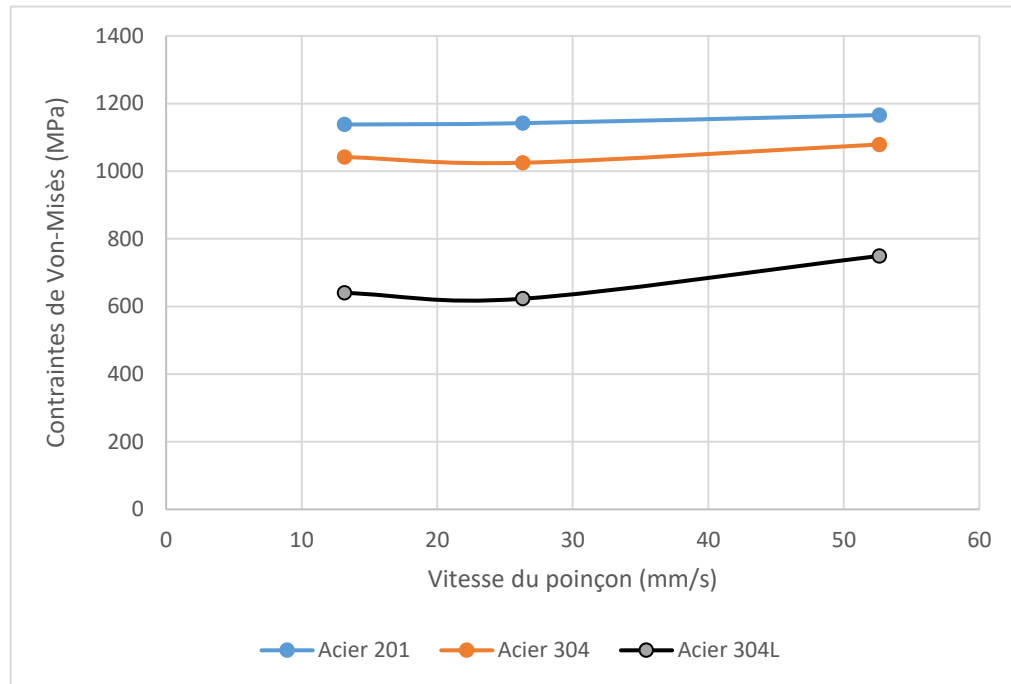


**Figure III.24 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une vitesse de 13,158 mm/s.



**Figure III.25 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une vitesse de 52,632 mm/s.

En résumé, la figure qui suit montre l'évolution des contraintes de Von-Misès avec la variation de la vitesse du poinçon pour les trois aciers inoxydables du flan.



**Figure III.26 :** Evolution des contraintes de Von-Misès avec la vitesse du poinçon.

Pour l'acier 201, les contraintes de Von-Misès augmentent avec l'augmentation de la vitesse du poinçon ; donc, il est préférable de diminuer relativement la vitesse du poinçon.

Pour les aciers 304 et 304L, la vitesse du poinçon égale à 26,316 mm/s est adéquate car elle offre relativement le moindre niveau des contraintes de Von-Misès.

Pour les aciers 201 et 304, la géométrie de l'embouti est préservée en forme suite au changement de la vitesse du poinçon ; par contre pour l'acier 304L, la géométrie de l'embouti n'est pas préservée en forme. Ceci explique bien que le choix de la vitesse du poinçon égale à 26,316 mm/s pour l'acier 304L est un bon choix.

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation numérique relatifs à l'effet de changement de l'épaisseur du flan, et ce pour les trois types d'aciers inoxydables constituant le flan.

Rappelons que l'épaisseur du flan a été prise initialement égale à 0,8 mm ; ainsi, nous allons considérer deux autres épaisseurs ; à savoir :  $h = 0,6$  et  $h = 0,7$  mm.

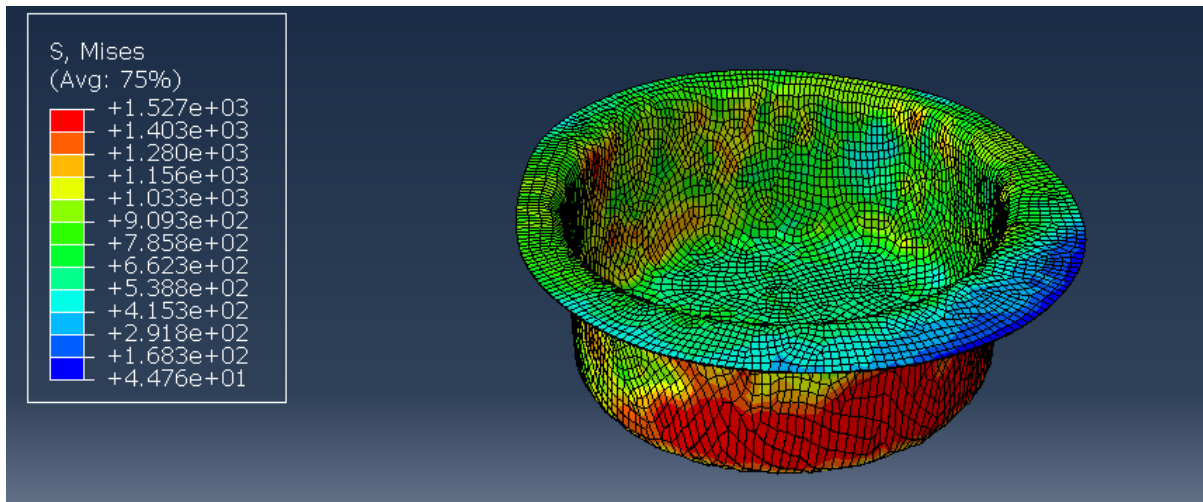


Figure III.27 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une épaisseur de 0,6 mm.

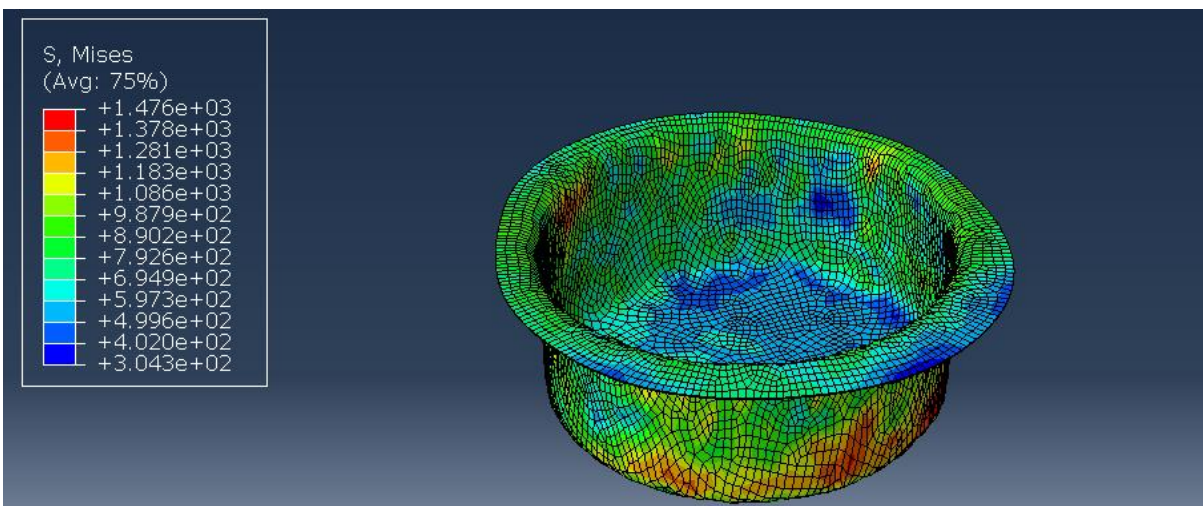


Figure III.28 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 201 avec une épaisseur de 0,7 mm.

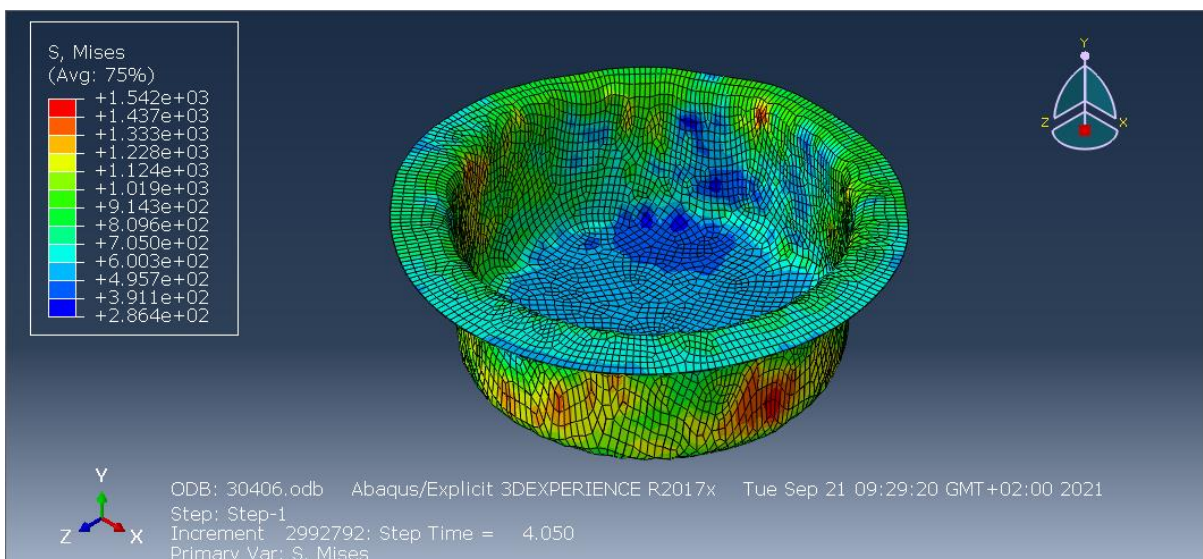
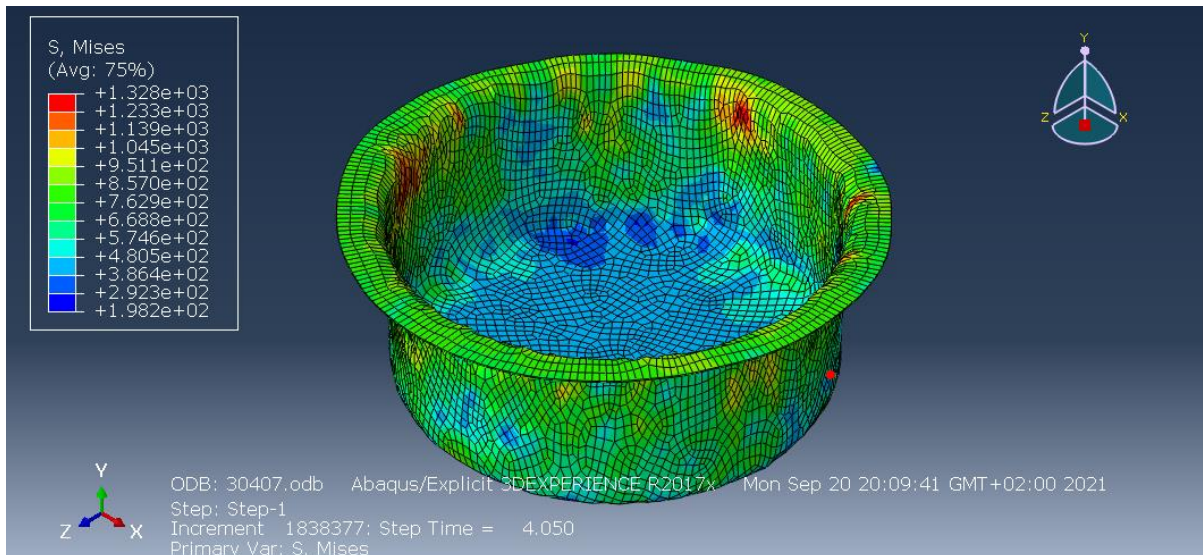
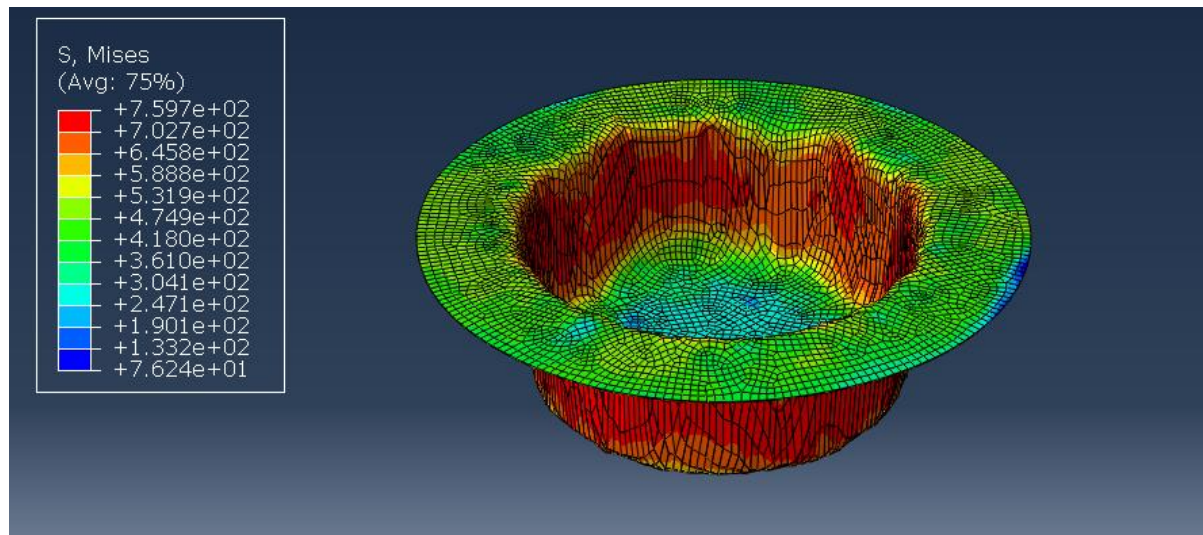


Figure III.29 : Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une épaisseur de 0,6 mm.

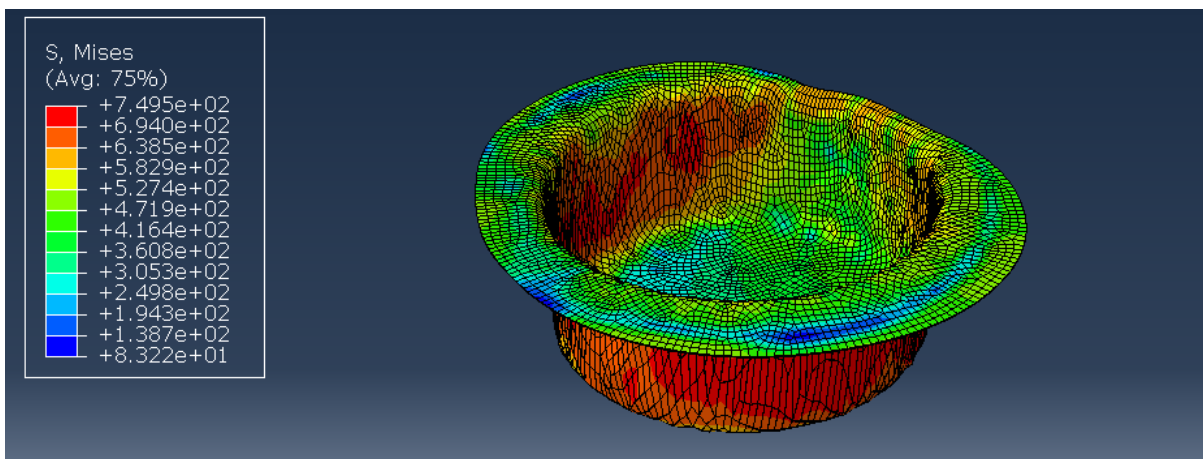




**Figure III.30 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304 avec une épaisseur de 0,7 mm.



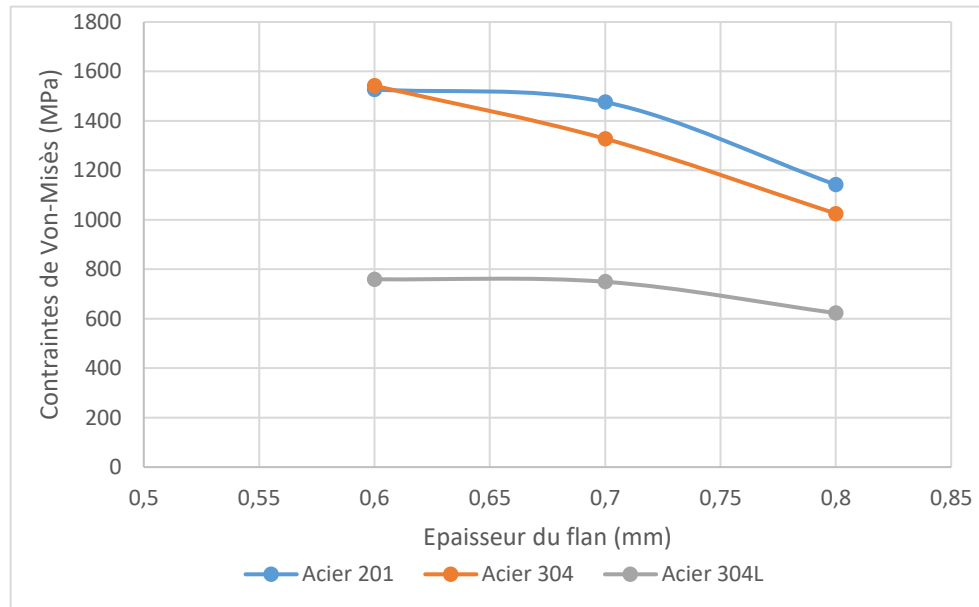
**Figure III.31 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une épaisseur de 0,6 mm.



**Figure III.32 :** Contraintes de Von-Misès pour l'acier 304L avec une épaisseur de 0,7 mm.



En résumé, la figure qui suit montre l'évolution des contraintes de Von-Misès avec la variation de l'épaisseur du flan pour les trois aciers inoxydables.



**Figure III.33 :** Evolution des contraintes de Von-Misès avec l'épaisseur du flan.

Pour les trois emboutis, les contraintes de Von-Misès diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du flan. Pour les aciers 201 et 304, les contraintes de Von-Misès sont importantes pour les épaisseurs de 0,6 et 0,7 mm ; aussi, la baisse des contraintes est remarquable pour une épaisseur de 0,8 mm, soit une chute de 300 à 500 MPa. Pour l'acier 304L, une épaisseur de 0,8 mm offre une baisse d'environ 200 MPa.

Enfin, nous allons clôturer ce chapitre par une comparaison entre les aciers 201 et 304 ; selon l'Institut Américain du Fer et de l'Acier, l'acier inoxydable peut être représenté par les séries 200, 300 et 400 dans lesquelles les aciers 201 et 304 sont couramment utilisés tout en offrant de bonnes propriétés de résistance à la corrosion, un bon usinage et une performance de polissage. Ils peuvent être considérés comme des substituts les uns des autres dans certaines applications [21].

La composition chimique est la clé pour étudier et déterminer les propriétés physiques des aciers 201 et 304, leurs compositions chimiques sont indiquées dans le tableau qui suit :

Qualité	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
AISI 304	≤0,08	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,03	18-20	8-10
AISI 201	≤0,15	≤1,00	5,5-7,5	≤0,05	≤0,03	13,5-15,0	3,5-5,5

**Tableau III.5 :** Composition chimique des aciers inoxydables 304 et 201 [21].

Aussi, l'acier 304 est plus cher que le 201 en raison de l'ajout de nickel, ce qui conduit également à une meilleure résistance à la corrosion que le 201. L'acier 201 contient plus de contenu de manganèse élevé avec une surface sombre ; donc, facile à rouiller.

Le matériau en acier inoxydable 201 est relativement dur par rapport à l'acier inoxydable 304 qui est plus résilient et sa résistance à la fatigue est bien meilleure que celle du 201.

Enfin, l'acier 201 peut être utilisé comme matériau de substitution de l'acier 304 en raison de son économie. Il est magnétique après traitement à froid et est utilisé dans le domaine de la qualité des véhicules ferroviaires ou de la décoration de bâtiments avec des exigences moins strictes. Par contre, l'acier 304 est résistant à la chaleur ; donc, le plus utilisé principalement dans les équipements de production alimentaire, les équipements chimiques, l'énergie nucléaire, etc.



# **Conclusion générale et perspectives**



## CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES

---

Dans le présent mémoire, nous nous sommes intéressés à l'amélioration d'un emboutissage cible par approche numérique.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur le procédé d'emboutissage pour le situer parmi l'ensemble des procédés de mise en forme existants. Puis, nous avons abordé les principaux défauts rencontrés dans les produits emboutis ainsi que les aspects opératoires qui permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité.

Nous avons exposé la problématique posée par la société Stainum pour un embouti cible fabriqué à partir d'aciers inoxydables 201, 304 et 304L. L'embouti cible est une marmite de cuisson alimentaire. La société a constaté un taux de rebut important en utilisant principalement l'acier 201.

Aussi, nous avons présenté l'intérêt des approches numériques pour le procédé d'emboutissage. Puis, nous avons évoqué les différents niveaux d'investigation pour la mise au point d'un embouti. Pour notre travail, nous avons adopté l'approche numérique 3D tout en utilisant l'outil de simulation Abaqus.

Les résultats de simulation ont montré que l'acier inoxydable 304L se prête a priori le mieux pour la fabrication de l'embouti cible du fait que les contraintes équivalentes de Von-Mises sont relativement moindres. Ceci est un avantage pour la seconde passe d'emboutissage dédiée, d'une part, à l'annulation des contraintes résiduelles induites par la première passe, et, d'autre part, à l'obtention finale du produit.

L'acier 304L est plus cher que le 201 en raison de l'ajout de nickel qui conduit à une meilleure résistance à la corrosion. L'acier 201 est plus dur, ceci présente un effet bénéfique pour l'embouti mais pas pour le poinçon qui verra sa durée de vie diminuer. Aussi, l'acier 201 peut rouiller plus vite du fait qu'il contient plus de manganèse, ceci est aussi néfaste pour les équipements de production alimentaire.

### *Perspectives :*

À travers cette modeste étude, nous espérons avoir pu apporter des éléments de réponse qui peuvent orienter la société Stainum dans ces choix. Reste à faire des tests de sensibilité relatifs au choix de la vitesse optimale d'emboutissage, de prendre en charge la seconde passe d'emboutissage pour l'obtention finale de l'embouti, et de considérer l'influence du fluide de lubrification.



**Références  
bibliographiques**



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mise\\_en\\_forme\\_d%27un\\_mat%C3%A9riau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mise_en_forme_d%27un_mat%C3%A9riau)
- [2] [http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M0-0/EXPORTS\\_S001.publi/web/res/MISE-METAUX.png](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M0-0/EXPORTS_S001.publi/web/res/MISE-METAUX.png)
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9\\_de\\_fabrication](https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9_de_fabrication)
- [4] F. Rondé-Oustau, "Conception et mise au point d'une gamme d'emboutissage", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7 540 / 1-14.
- [5] R. Grèze, "Étude expérimentale et numérique du retour élastique des alliages d'aluminium après emboutissage", Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2009.
- [6] <http://emprotec.fr/production/emboutissage-profond/>
- [7] R. Martin, "Formage à la presse", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7 510 / 1-22.
- [8] F. Mercier, "Contribution à la modélisation de l'emboutissage de tôles minces par l'approche inverse", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1998.
- [9] T. Sedrat, "Étude et conception d'un procédé d'emboutissage : Appliqué aux moules d'emboutissage pour emballage métallique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2007.
- [10] A. Col, "Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7 510 / 1-20.
- [11] [http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORTS\\_S114.publi/web/co/module\\_S\\_114\\_2.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORTS_S114.publi/web/co/module_S_114_2.html)
- [12] D. Lepadatu, "Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse", Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2006.
- [13] [http://www.unit.eu/cours/MediaMef3/simulation-forgeage/co/Optimisation\\_en\\_\\_forgeage.html](http://www.unit.eu/cours/MediaMef3/simulation-forgeage/co/Optimisation_en__forgeage.html)
- [14] M. Azaouzi, "Modélisation et optimisation numérique de l'emboutissage de pièces de précision en tôlerie fine", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
- [15] [http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS\\_S122.publi/web/co/module\\_S122\\_3.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS_S122.publi/web/co/module_S122_3.html)

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [16] H. Abichou, "Simulation de l'emboutissage à froid par une méthode asymptotique numérique", Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de Génie Mécanique et Productique, Université de Metz, 2001.
- [17] M. Ghouini et M-K. Kouadria, "Modélisation du contact à l'interface outil-copeau : Approche analytique et numérique", Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2019.
- [18] [https://www.researchgate.net/publication/237337491\\_Formability\\_of\\_austenitic\\_stainless\\_steels\\_under\\_warm\\_hydroforming\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/237337491_Formability_of_austenitic_stainless_steels_under_warm_hydroforming_conditions)
- [19] S. Lee & al., "Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials – Experiments and modeling", *International Journal of Plasticity*, 22, pp. 2118–2145, 2006.
- [20] H. Xuan & al., "Containment Ability of Kevlar 49 Composite Case under Spinning Impact", *J. Aerosp. Eng.*, 31(2): 04017096, 2018.
- [21] <http://fr.lksteelpipe.com/news/how-to-distinguish-201-and-304-steel-22916068.html>.

### ملخص:

في هذا المشروع، نحن مهتمون بتحسين الختم (السحب العميق) من خلال محاكاة رقمية. القطعة المضغوطة هو منتج مخصص لطهي الطعام، ومصنع من الفولاذ المقاوم للصدأ 201، 304 و304L. لهذا الغرض، قمنا بتصميم عناصر الختم (السحب العميق) وأجرينا محاكاة رقمية باستخدام برنامج Abaqus. تظهر نتائج المحاكاة أن الفولاذ المقاوم للصدأ 304L هو الأنسب لتصنيع المنتج. الكلمات الرئيسية: ختم (سحب عميق)، فولاذ مقاوم للصدأ، محاكاة رقمية، Abaqus، طبخ غذائي.

### Résumé :

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à l'amélioration d'un emboutissage cible par approche numérique. L'embouti est un produit destiné à la cuisson alimentaire, et fabriqué à partir d'aciers inoxydables 201, 304 et 304L. À cet effet, nous avons conçu les éléments d'emboutissage et mené une simulation numérique en utilisant le logiciel Abaqus. Les résultats de simulation montrent que l'acier inoxydable 304L se prête le mieux à la fabrication du produit.

**Mots-clés :** Emboutissage, Acier inoxydable, Simulation numérique, Abaqus, Cuisson alimentaire.

### Abstract:

In this work, we focused on improving a target stamping by digital approach. The stamp is a product intended for food cooking, and made from stainless steels 201, 304 and 304L. For this purpose, we designed the stamping elements and conducted a numerical simulation using the Abaqus software.

Simulation results show that 304L stainless steel is best suitable for manufacturing the product.

**Keywords:** Stamping, Stainless steel, Numerical simulation, Abaqus, Food cooking.